

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 20 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

(код і назва)

на тему: «Властивості поглинаючих композитних матеріалів досліджені методом електронної мікроскопії»

Виконав: студент 6 курсу, групи ДП-82мп

(шифр групи)

Гонтар Олександр Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Верцанова О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

з нормоконтролю

(назва розділу)

доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з інформаційних питань

(назва розділу)

ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доц., к.т.н. Казміренко В.А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми роботи. Дослідження діелектричних властивостей дисперсних систем є важливим в численних завданнях як фундаментального, так і прикладного характеру. Досягнення наноелектроніки значно посилили інтерес до діелектричних властивостей ультрадисперсних систем.

На основі дисперсних систем можливе створення матеріалів для захисту від впливу СВЧ випромінювання. . Очікується, що використання таких нанодисперсних композитів з нанорозмірними частинками призведе до значно більшого розсіювання електромагнітного випромінювання, ніж при використанні більших металевих частинок. Ультрадисперсні системи також можуть широко використовуватися в електро-магнітній і електронної техніці, медицині, в якості композитних паст і т.д. Щоб знизити випромінювання, можна використовувати композитні та електропровідні полімерні матеріали низької добротності. Це матеріали з поглинанням і відбиттям електро-магнітної хвилі, якими можна керувати. Одним з переваг таких матеріалів є можливість простого керування їхніми параметрами шляхом зміни концентрації впроваджуваного компонента в композит.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота пов'язана з науковими програмами, планами та темами що розроблюються на кафедрі.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є дослідження властивостей полімерних композитів методом електронної мікроскопії. Для досягнення мети, необхідно виконати наступні задачі:

Моделювання діелектричних властивостей полімерних композиційних матеріалів у СВЧ діапазоні частот.

Експериментальна перевірка отриманої моделі.

Об'єктом дослідження є поглинаючі композити.

Предмет дослідження є дисперсні системи, що складаються з діелектричної матриці SiO₂.

Особистий внесок здобувача:

- дослідження мікроструктури і хімічного аналізу експериментальних матеріалів
- Дослідження діелектричних властивостей композиційних матеріалів у СВЧ діапазоні частот для різних зразків матеріалів.

Структура і об'єм роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаної літератури. Загальний обсяг дисертації становить 100 сторінок. Робота включає 37 рисунків, 28 таблиць, список використаних джерел з 49 найменувань.

Ключові слова: композиційний матеріал, поглинальні покриття, електронна мікроскопія, растровий мікроскоп.

ABSTRACT

Actuality of theme. Investigation of the dielectric properties of dispersed systems is important in numerous problems of both fundamental and applied nature. The advances in nanoelectronics have greatly increased the interest in the dielectric properties of ultrafine systems. Of particular interest are their properties in the microwave range.

On the basis of disperse metal-dielectric systems, it is possible to create materials to protect against the effects of microwave radiation. . It is expected that the use of such nanodispersed composites with nanoscale metal particles will result in much greater scattering of electromagnetic radiation than when using larger metal particles. Ultra-dispersive systems can also be widely used in electro-magnetic and electronic engineering, medicine, as composite pastes, etc. Composite and electrically conductive low-quality polymeric materials can be used to reduce radiation. These are electromagnetic wave absorption and reflection materials that can be controlled. One of the advantages of such materials is the ability to easily control their parameters by changing the concentration of the embedded component in the composite.

Relationship with working with scientific programs, plans, topics.

The work is related to the scientific programs, plans and topics being developed at the department.

The purpose and objectives of the study. The purpose of this study is to study the properties of polymer composites by electron microscopy. To achieve this goal, you must complete the following tasks:

Modeling of dielectric properties of polymer composite materials in the microwave frequency range.

Experimental verification of the model obtained.

The object of study is absorbing composites.

The subject of the study is disperse systems consisting of a dielectric matrix SiO₂.

Applicant's personal contribution:

- study of microstructure and chemical analysis of experimental materials
- Investigation of dielectric properties of composite materials in the microwave frequency range for different material samples.

Structure and scope of work. The work consists of an introduction, four sections, conclusions and a list of used literature. The total volume of the dissertation is 100 pages. The work includes 37 figures, 28 tables, a list of sources used with 49 titles.

Keywords: composite material, absorption coatings, electron microscopy, raster microscope.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1: КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	10
1.1 ВЛАСТИВОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	11
1.2. ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ (ПКМ)	14
1.3. ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ	17
РОЗДІЛ 2: ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ.....	27
2.1. ЕЛЕКТРОННИЙ МІКРОСКОП.....	28
2.2. ПРИЛАД І ПРИНЦИП РОБОТИ РЕМ.....	34
2.3.ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА З РЕЧОВИНОЮ	41
2.3.1 ОСНОВНІ МЕХАНІЗМИ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОНІВ.....	41
2.3.2 ОСНОВНІ ДЖЕРЕЛА СИГНАЛІВ, ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В РЕМ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ	44
2.3.3. ОБЛАСТЬ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОНІВ ЗОНДА З РЕЧОВИНОЮ.....	52
2.4. ФОРМУВАННЯ КОНТРАСТУ У РЕМ	57
2.4.1. ОСНОВНИЙ МЕХАНІЗМ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ У РЕМ..	62
2.4.2. УСТАНОВКА ЗРАЗКІВ В КОЛОНІ МІКРОСКОПА	64
2.4.2 ВИБІР ДІЛЯНКИ ДЛЯ АНАЛІЗУ	64
РОЗДІЛ 3: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	65
РОЗДІЛ 4: РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	98

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КП-композиційни матеріал

ПКМ-полімерний композиційний матеріал

НВЧ- надвисокочастотне випромінювання

ККМ- керамічний композиційний матеріал

ЕМХ- енергія електромагнітних хвиль

ЕМІ- електромагнітний імпульс

РЕМ- растровий електронний мікроскоп

СЕМ- скануючий електронний мікроскоп

НПД- напівпровідниковий детектор

ЕНТ-прискорююча напруга

ВСТУП

Розвиток ринкових відносин в країні вимагає створення нових конкурентоспроможних матеріалів як для внутрішнього, так і для зовнішнього ринку, що особливо важливо. У сучасних умовах розвитку промисловості значно підвищилися вимоги до антифрикційних матеріалів та деталей машин, що працюють у важких умовах експлуатації. Тому розробка і застосування композиційних матеріалів (КМ) або просто композитів, які складаються з матриці й розподілених в ній армуючих елементів і, завдяки цьому, мають якісно новими, часто унікальними властивостями, є одним з основних напрямків розвитку сучасного матеріалознавства та машинобудування. У більшості випадків тільки КМ можуть задовольнити вимогам нової техніки, для якої характерно більш жорсткі умови експлуатації: підвищення навантажень, швидкостей, температур, агресивності середовищ, зменшення ваги і т.д. Традиційні матеріали вже не можуть задовольнити ці запити через те, що ресурс підвищення властивостей багатокomпонентних металевих сплавів за рахунок легування практично вичерпаний.

РОЗДІЛ 1: КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Композиційні матеріали- штучно створені матеріали, що складаються з двох або більше неоднорідних і нерозчинних одна в одній компонентів, що з'єднуються між собою фізикохімічними зв'язками.

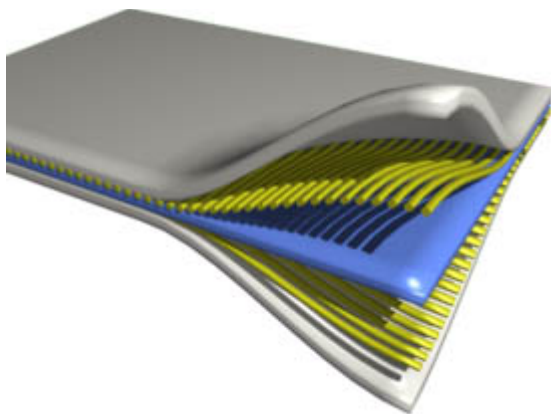


Рисунок 1.Композиційний матеріал

Одним з компонентів композиційних матеріалів є арматура, або наповнювач, що забезпечують необхідні механічні характеристики матеріалу, а іншим компонентом - матриця що забезпечує спільну роботу армуючих елементів. В ролі матриці зазвичай використовують полімерні, металеві, керамічні і вуглецеві матеріали, в залежності від типу яких композиційні матеріали здобувають загальну назву.

Щоб була краща міцність використовують скляні, борні, вуглецеві, органічні, ниткоподібні кристали (карбідів, боридів, нітридів та ін.) І металеві дроти, які мають високу міцність і твердість. При формуванні композиції ефективно використовуються індивідуальні властивості складових елементів композицій.

1.1 ВЛАСТИВОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Властивості композиційних матеріалів залежать від складу компонентів, співвідношення і міцності зв'язку між ними. Комбінуючи об'ємний зміст компонентів, можна в залежності від призначення отримати матеріали з необхідними значеннями міцності, жароміцності, модуля пружності або отримувати композиції з необхідними спеціальними властивостями, наприклад магнітними і т.п.

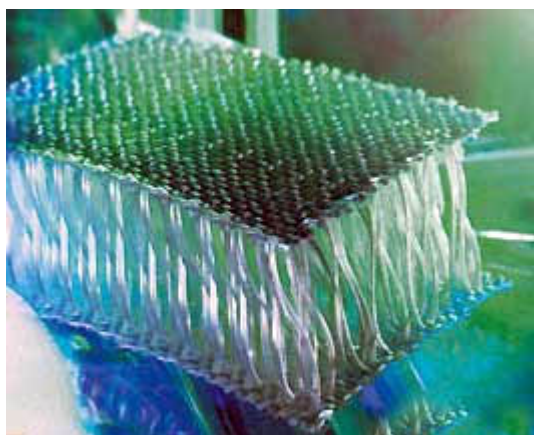


Рисунок 1.1. Композитний матеріал

Композиційні матеріали мають високу питому міцність, жорсткість (модуль пружності 130-140 ГПа), високу зносостійкість, втомну міцність. З них можна виготовити розміростабільні конструкції. Композиційні матеріали є дуже перспективними конструкційними матеріалами для багатьох галузей машинобудування.

Композиційні матеріали класифікують з геометрії наповнювача, розташуванню його в матриці і природі компонентів, схеми розташування наповнювачів, за своєю природою компонентів, структурі композиційного матеріалу.

Композиційні матеріали поділяють на чотири групи:

1. Композитні матеріали, з компонентами металів або сплавів;

2. Композитні матеріали, які включають компоненти з неорганічних сполук оксидів, карбідів, нітридів та ін .;

3. Композитні матеріали, які складаються з неметалічних елементів, вуглецю, бору та ін .;

4. Композитні матеріали, які містять компоненти з органічних сполук (епоксидні, поліефірні, фенольні та інші смоли).

За структурою композити поділяються на декілька основних класів: волокнисті, шаруваті, дисперснозміцнені, зміцнені частками і нанокомпозити.

Армовані волокнами волокнисті композити або ниткоподібними кристалами. Механічні властивості композиту можуть змінюватися за рахунок орієнтації розміру і концентрації волокон. Крім того, армування волокнами дозволяє надати матеріалу анізотропію властивостей (відмінність властивостей в різних напрямках). Також можна додати матеріалу електропровідність вздовж заданої осі за рахунок добавки волокон провідників. Матриця і наповнювач у шаруватих композиційних матеріалах розташовуються шарами.

Інші класи композитних матеріалів можна характеризувати наповненням матриці частинками армуючої речовини, які розрізняються дисперсністю часток. Так, дисперснозміцнені композити включають від 1 до 15% (за обсягом) частинок розміром від 0,01 до 0,1 мкм. Композити, зміцнені частками, містять 20-25% (за обсягом) частинок розміром понад 1 мкм. Розміри частинок, що входять до складу нанокомпозитів, складають 10-100 нм.

Як і у всіх технічних матеріалах, композити мають особливі сильні та слабкі сторони, що слід враховувати на етапі конкретизації. Композити аж ніяк не є правильним матеріалом для кожної роботи.

Однак головною рушійною силою розробки композитів було те, що поєднання арматури та матриці можна змінити для задоволення необхідних кінцевих властивостей компонента. Наприклад, якщо кінцевий компонент

потребує вогнестійкості, на стадії розробки може використовуватися протипожежна матриця, щоб вона мала цю властивість.

Зменшення ваги

- Основною причиною вибору композитів є поліпшена питома міцність / жорсткість (питома міцність / жорсткість на одиницю ваги).
- Це допомагає зменшити споживання палива, або збільшити прискорення або дальність в транспорті.
- Це дозволяє легше, швидше встановити або прискорити рух работ руки і зменшує опорні конструкції або фундаменти.
- Це покращує стабільність на вершині суден і морських споруд та плавучість для глибоководних застосувань.

Довговічність та обслуговування

- Композити не іржавіють, що дуже важливо, особливо в морських та хімічних середовищах. Потреба в догляді та фарбуванні зменшується або усувається.
- Композитні підшипники для морських двигунів і мостів не потребують змащування і не піддаються корозії.
- Поєднуйте відмінну стійкість до втоми, а композити можуть в декілька разів збільшити термін служби виробу в багатьох випадках.

Додана функціональність

- Композити є теплоізоляторами, що добре захищає від пожежі та вибуху або кріогенного застосування.
- Електроізоляція корисна для залізничних споруд і прозорості РЛС. Електропровідна сітка або покриття можуть бути інтегровані за потреби, наприклад, для відображення радіолокаційних або відволікаючих блискавок.
- Датчики, електроніка та кабелі можуть бути вбудовані.

Свобода дизайну

- Дизайн композитів дозволяє забезпечити свободу архітектурної форми.
- Багато деталей можна об'єднати в одну, а жорсткість, вставки тощо можна інтегрувати у форму.
- Композити можна підібрати відповідно до заявки, вибираючи складові матеріали та вкладаючи додаткову функціональність.

1.2. ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ (ПКМ)

Композити, в яких матрицею служить полімерний матеріал, є одним з найбільш численних і різноманітних видів матеріалів. Їх застосування в різних областях дає значний економічний ефект. Наприклад, використання ПКМ при виробництві космічної та авіаційної техніки дозволяє заощадити від 5 до 30% ваги літального апарату. А зниження ваги, наприклад, штучного супутника на навколосезонній орбіті на 1 кг призводить до економії 1000 \$. Як наповнювачі ПКМ використовуються безліч різних речовин.

А) Склопластики - полімерні композиційні матеріали, армовані скляними волокнами, які формують з розплавленого неорганічного скла. В якості матриці найчастіше застосовують як термореактивні синтетичні смоли (фенольні, епоксидні, поліефірні і т. Д.), Так і термопластичні полімери (поліаміди, поліетилен, полістирол і т. Д.). Ці матеріали мають досить високою міцністю, низькою теплопровідністю, високими електроізоляційними властивостями, крім того, вони прозорі для радіохвиль. Використання склопластиків почалося в кінці Другої світової війни для виготовлення антенних обтічників - куполоподібних конструкцій, в яких розміщується антена локатора. У перших армованих склопластиках кількість волокон було невеликим, волокно вводилося, головним чином, щоб нейтралізувати грубі дефекти тендітної матриці. Однак з часом призначення матриці змінилося - вона стала служити тільки для склеювання

міцних волокон між собою, зміст волокон в багатьох стеклопластиках досягає 80% по масі.

Б) Вуглепластики-наповнювачем в цих полімерних композитах служать вуглецеві волокна. Вуглецеві волокна отримують з синтетичних і природних волокон на основі целюлози, сополімерів акрилонітрилу, нафтових і кам'яновугільних пеков і т. Д. Термічна обробка волокна проводиться, як правило, в три етапи (окислення - 220°C , коксування - $1000-1500^{\circ}\text{C}$ і графітизація - $1800-3000^{\circ}\text{C}$) і призводить до утворення волокон, що характеризуються високим вмістом (до 99,5% по масі) вуглецю. Залежно від режиму обробки та вихідної сировини отримане углеволокно має різну структуру. Для виготовлення вуглепластиків використовуються ті ж матриці, що і для склопластиків - найчастіше - термореактивні і термопластичні полімери.

На основі вуглецевих волокон і вуглецевої матриці створюють композитні вуглеграфітові матеріали - найбільш термостійкі композитні матеріали (вуглепластики), здатні довго витримувати в інертних або відновлювальних середовищах температури до 3000°C . Існує кілька способів виробництва подібних матеріалів. По одному з них вуглецеві волокна просочують фенолформальдегідною смолою, піддаючи потім дії високих температур (2000°C), при цьому відбувається піроліз органічних речовин і утворюється вуглець. Щоб матеріал був менш пористим і більш щільним, операцію повторюють кілька разів. Інший спосіб отримання вуглецевого матеріалу полягає в прожаренні звичайного графіту при високих температурах в атмосфері метану. Мелкодисперсний вуглець, що утворюється при піролізі метану, закриває всі пори в структурі графіту. Щільність такого матеріалу збільшується в порівнянні з щільністю графіту в півтора рази.

В) Органопластики-композити, в яких наповнювачами служать органічні синтетичні, рідше - природні та штучні волокна у вигляді джгутів, ниток, тканин, паперу і т. д. У термореактивних органопластиках матрицею служать, як правило, епоксидні, поліефірні і фенольні смоли, а також полііміди. Матеріал містить 40-70% наповнювача. Зміст наповнювача в органопластиках на основі

термопластичних полімерів - поліетилену, ПВХ, поліуретану і т. П. - варіюється в значно більших межах - від 2 до 70%. Органопластичні володіють низькою щільністю, вони легше склої вуглепластиків, відносно високою міцністю при розтягуванні; високий опір удару і динамічним навантаженням, але, в той же час, низькою міцністю при стиску і вигині.

Композитні матеріали на основі кераміки

Армування керамічних матеріалів волокнами, а також металевими і керамічними дисперсними частинками дозволяє отримувати високоміцні композити, однак, асортимент волокон, придатних для армування кераміки, обмежений властивостями вихідного матеріалу. Часто використовують металеві волокна. Опір розтягуванню зростає незначно, але зате підвищується опір тепловим ударам - матеріал менше розтріскується при нагріванні, але можливі випадки, коли міцність матеріалу падає. Це залежить від співвідношення коефіцієнтів термічного розширення матриці і наповнювача.

Армування кераміки дисперсними металевими частинками призводить до нових матеріалів з підвищеною стійкістю, стійкістю щодо теплових ударів, з підвищеною теплопровідністю. З високотемпературних керметів роблять деталі для газових турбін, арматуру електродових печей, деталі для ракетної і реактивної техніки. Тверді зносостійкі кермети використовують для виготовлення ріжучих інструментів і деталей. Крім того, кермети застосовують в спеціальних областях техніки - це теплоізолюючі елементи атомних реакторів на основі оксиду урану, фрикційні матеріали для гальмівних пристроїв і т. Д.

Керамічні композитні матеріали отримують методами гарячого пресування (таблетування з подальшим спіканням під тиском) або методом шликерного лиття (волокна заливаються суспензією матричного матеріалу, яка після сушіння також піддається спіканню).

- композитна арматура
- гібридний матеріал

1.3. ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Електромагнітний фон представлений випомінюваннями від джерел природного і техногенного походжень. За останні десятиріччя рівень електромагнітного фону віз ріс в кілька тисяч разів і становить небезпеку для життєдіяльності і здоров'я людини [1, 2].

Для науковообґрунтованого рішення проблеми електромагнітної безпеки необхідно вивчення механізмів взаємодії ЕМВ з біологічними об'єктами, умов розповсюдження і перетворення енергії електромагнітних хвиль (ЕМХ) в біологічних клітинах і тканинах. біологічна дія радіохвиль відбувається за кількома механізмами і визначається інтенсивністю, тривалістю, частотним діапазоном, модуляційному тимчасовими характеристиками ЕМІ. Досить добре вивчений і застосовується на практиці парниковий ефект впливу мікрохвиль, який виражається в підвищенні температури опромінюється внаслідок виділення в ньому значної кількості тепла. Цей ефект спостерігається при дії ЕМВ порівняно великої інтенсивності (15 мВт / см² і більше) [2]. Найбільш ефективно поглинання мікрохвиль наголошується в тканинах з великим вмістом води: кров, лімфа, кристалик ока, внутрішньоклітинна рідина та ін. Це зумовлено поляризацією молекул води під дією ЕМІ і її високою діелектричною проникністю.

При менших значеннях інтенсивності відбувається «нетепловое», що не викликає підвищення температури об'єкта енергоінформаційного впливу ЕМВ [2]. воно приблизно пов'язано з біофізичними процесами формування в ЕМП особливих енергетичного, фізикохімічного і конформаційного станів біомолекул і макромолекулярних систем. Теорія нетеплового специфічної дії мікрохвиль на біооб'єкти ще недостатньо розроблена, що обґрунтовують необхідність подальших експериментальних і теоретичних досліджень в цій області. В існуючій теорії «нетеплового» впливу мікрохвиль на біологічні об'єкти передбачається, що виникають ефекти обумовлені кооперативними процесами, заснованими на резонансних взаємодіях біологічних макромолекул, наприклад, білкових молекул, що входять в склад мембрани [2].

Реакція організму на НВЧ вплив спрямована на підтримання гомеостазу [3]. Результат цього впливу є сумою ефектів дії ЕМВ, реакцій протипод наслідком цих ефектів і репаративних процесів. Параметри ЕМІ, характер електромагнітних поразень об'єкта і індивідуальні компенсаторні можливості організму обумовлюють неспецифічність картини розладу електромагнітної природи.

Встановлюють вимоги до забезпечення безпеки і нешкідливості впливу на людину ЕМІ радіочастотного діапазону 30 кГц-300 ГГц [2, 4]. Згідно з вимогами даних, в діапазоні частот 300 МГц-300 ГГц інтенсивність ЕМІ РЧ оцінюється значеннями щільності потоку енергії (ППЕ) в Вт / м² або в мкВт / см². енергетична експозиція (ЕЕ) ЕМІ є математичною функцією ППЕ і часу (Т) його впливу на людину, виражається в (мкВт / см²) × год і розраховується за формулою 1:

$$EE = PPE \times T \quad (1)$$

Гранично допустимі значення ЕЕ ЕМІ діапазону 300 МГц-300 ГГц в виробничих умовах по ППЕ не повинна перевищувати 200 мкВт / см². Для осіб, які не досягли 18 років, і жінок в періоди вагітності та годування груддю встановлені більш жорсткі ПДУ.

Біофізичною основою для розробки вітчизняних нормативних документів по служили дві групи біоефектів крім

«Короткочасного термічного»:

— кумуляція ефекту впливу в організмі при тривалому безперервному впливі, особливо в межах до теплових рівнів;

— оборотність ефектів і адаптація організму при наявності великих пауз між експозиціями.

— Зарубіжні стандарти розробляються на експериментально-розрахункових методах, причому висновки будуються на основі дослідів з вираженими ураженнями біооб'єкту. Такий підхід дозволив виконати безперервне нормування у всьому діапазоні ЕМІ від 0 Гц до 300 ГГц.

— У таблиці 1 представлені ПДУ ППЕ в діапазоні частот 300 МГц-300

ГГц у виробництві в залежності від про тривалості впливу, відповідно до вимог Гігієнічного нормативу

— «Гранично допустимі рівні електромагнітних випромінювань радіочастотного діапазону при їх впливі на людину ».

Таблиця 1.1 - ПДУ ППЕ в діапазоні частот 300 МГц-300 ГГц в виробничих умовах в за залежності від тривалості впливу

Тривалість дії Т, ч	ПДУПРЕ, мкВт / см ²
8,0 і більше	25
4,0	50
2,0	100
1,0	200
0,20 і менше	1000

У відповідності з «вимогами до електромагнітних випромінювань радіочастотного діапазону при їх впливі на людину »захист людини від впливу ЕМП повинен здійснюватися шляхом проведення організаційних, інженерно-технічних, лікувальнопрофілактичних заходів, а також застосування засобів індивідуального захисту [2, 4].

Організаційні заходи захисту від впливу ЕМП включають:

- вибір безпечного режиму роботи і джерел ЕМП;
- обмеження часу і місця знаходження персоналу в зоні впливу ЕМП.

Захист часом застосовується, коли немає можливості знизити інтенсивність ЕМП до ПДУ. Захист відстанню застосовується, якщо неможливо послабити ЕМП і ЕМП іншими заходами, в тому числі захистом часом. Захист відстанню покладений в основу нормування випромінювань для визначення необхідного розриву між джерелами ЕМП та житловими будинками, службовими приміщеннями і т.п. Для кожної установки, що випромінюють електромагнітну енергію, повинні визначатися санітарнозахисні зони, в яких інтенсивність ЕМП і ЕМП перевищує ПДК.

інженернотехнічні заходи повинні забезпечувати зниження рівнів ЕМП і ЕМІ на робочих місцях шляхом впровадження нових технологій і застосування засобів колективного та індивідуального захисту (коли фактичні рівні ЕМП на робочих місцях перевищують ПДУ, встановлені для виробничих впливів).

інженернотехнічні заходи захисту від впливу ЕМІ включають:

- раціональне розміщення джерел ЕМВ;
- використання коштів, обмежуючих надходження електромагнітної енергії на робочі місця працівників (поглиначі потужності, екрани, мінімальна потужність генератора);
- позначення і огороження зон з підвищеним рівнем ЕМВ.

Інженернотехнічні захисні міри прийняття будуються на використанні явища екранування ЕМП і ЕМІ безпосередньо в місцях перебування людини.

Для захисту населення від впливу ЕМІ в будівельних конструкціях можуть застосовуватися електропровідні вуглецеві або металеві сітки, металізувати плівки, тканини на основі синтетичних волокон, а також спеціально розроблені будівельні матеріали. Методи хімічної і вакуумної металізації тканин і волокон дозволяють регулювати товщину нанесеного металевих шару від сотих долей до одиниць мікрометрів і в широкому діапазоні змінювати поверхневий питомий опір тканин. ЕМІ володіють малою товщиною, легкістю, гнучкістю і можуть комбінуватися з іншими матеріалами.

Ефективність засобів захисту визначаються за ступенем ослаблення інтенсивності ЕМП і ЕМІ, що виражається коефіцієнтом екранування (коефіцієнт поглинання або відбиття).

Радіопоглинаючі матеріали. Області застосування композитних РПМ різноманітні. Композитні радіогерметуючі поглиначі енергії НВЧ-випромінювання запобігають витік електромагнітної енергії з радіоелектронної апаратури, забезпечуючи стійкість. Вони служать для захисту від НВЧ-випромінювання операторів радіо локаційних станцій, радіофізичних приладів і іншого радіотехнічного обладнання, користувачів ЕОМ, побутових мікро-

хвильових печей, стільникових телефонів і т.п. Також РПМ є ефективним засобом боротьби з паразитною інтерференцією радіохвиль, перевідбиттів від сусідніх об'єктів. РПМ застосовуються для маскуванню коштів озброєння і військової техніки від виявлення радіолокаційними засобами. В наш час розроблена і застосовується на об'єктах, що проектується за технологією Stealth, гамма композиційних РПМ [5, 6].

При взаємодії ЕМВ з РКК відбуваються процеси відображення, поглинання, багатократного розсіювання (внаслідок структурної і геометричної неоднорідності матеріалу) і інтерференції радіохвиль. здатність матеріалу поглинати НВЧ випромінювання залежить від його складу і структури. РЗЗ не забезпечують поглинання випромінювання в широкому діапазоні частот, а характеризуються кращим поглинанням при певних частотах ЕМІ. Не існує універсального поглинаючого матеріалу, пристосованого для поглинання ЕМВ у всьому частотному діапазоні.

Широка номенклатура РПМ предназначена для різних сфер технічного приловання. Вода є найпростішим природним поглиначем енергії ЕМВ НВЧ-діапазону, особливо міліметрових хвиль. Саме з молекул структурованої води пов'язано багато ефекти впливу ЕМП і ЕМІ на біологічні клітини і тканини [7]. Тому воду можна використовувати як поглинач ЕМІ, вводячи її в пористі і гігроскопічні полімерні РПМ. Деякий час об'єкт може бути захищений від ЕМІ парами води. Замість води в якості функціонального наповнювача (ФН) РКК можуть бути використані хімічні сполуки, що володіють великими втратами в діапазоні НВЧ.

Є безліч патентів на складних феритових компонентах для поглиначів різних діапазонів. Серед них, наприклад, серія поглинаючих матеріалів зі структурою шпінелі з загальною формулою MeFe_2O_4 , де $\text{Me} = \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}, \text{Mg}$ і т. д. Ці матеріали призначені для діапазону ЕМВ 0,5-12 ГГц. Розмір частинок порошків феритів, що поглинають НВЧ випромінювання на частотах 0,5-1,5 ГГц, становить 1,65-0,7 мкм, а в діапазоні 2,5-12 ГГц - 0,1 мкм. перевагою феритів поглиначів є їх мала товщина (кілька міліметрів). Однак вони трудомісні у виготовленні і нетехнологічними, так як доводиться наклеювати

ферритові пластинки на поверхню, що захищають металеві деталі. Крім того, такі поглиначі мають недостатньо широку смугу робочих частот.

Більш технологічні РПМ на основі саме цього порошку фериту або карбонильного заліза з полімерними сполуками. Такі суміші наносять на поверхню, що захищається пензлем або розбризкуванням в вигляді лакофарбового покриття або наклеюють у вигляді листів.

При створенні легких РПМ використовують полімерні композити, що містять порожні мікросфери і нанотрубки на основі фулеренів з добавками магнітних іонів, а також покриття з наповнювачами зі скляних мікросфер, покритих залізом або ферритом. такі матеріали при товщині 1 мм забезпечують величину загасання 12-20 дБ в діапазоні ЕМІ 2-10 ГГц.

Принципово нові можливості при створенні РКК відкриває порівняно новий клас речовин: сегнетомагнетики, сегнето, антисегнето або властивості яких поєднуються з феро, анти феро або ферромагнітними властивостями і взаємопов'язані в деякому інтервалі температур в одному речовині [8]. Наприклад, сегнетоелектрики мають дуже високу діелектричну проникність (1000-10000), що зберігається аж до діапазону НВЧ. На сантиметрових хвилях в сегнетокераміки має місце діелектрична дисперсія, в результаті якої дійсна частина діелектричної проникності знижується до декількох сотень, а тангенс кута діелектричних втрат зазнає максимум. Найбільш перспективними по технології, експлуатаційним і економічним критеріям є РПМ на основі полімерних композитів. Такі матеріали не тільки поєднують властивості вхідних інгредієнтів, а й набувають нових властивостей, не притаманних окремим компонентам. У розвитку техніки радіопоглинання особлива роль належить композитним матеріалам на основі термопластів. Гідність термопластичних композитних РПМ полягає в поєднанні високої хімічної стійкості, непоганим механічним властивостям з технологічністю переробки та низькою вартістю.

Композитні матеріали класифікують за природою полімерного сполучного, ФН і структурним ознаками. Необхідна умова досягнення матеріалом заданого рівня радіотехнічних параметрів - наявність в його складі

компонентів, що забезпечують втрати НВЧ енергії. До числа таких компонентів відносять діелектричні, електропровідні, магнітні і комбіновані наповнювачі.

Згідно з літературними даними, типів ми ФН РПМ є:

1) електропровідні порошкоподібні матеріали (вугілля, сажа, графіт, метали - сталь, чавун, залізо, алюміній, кобальт, свинець, цинк, олово, мідь і ін., солі металів) зі сферичною, циліндричною, лускатою і ін. формою частинок;

2) проводять вуглецеві, металеві і металвуглеродні волокна, вуглетканини, металічні нитки, пластинки, смужки фольги, обрізки дроту, сітки складної форми, решітки, Резонансні елементи у вигляді хрестоподібних диполів або замкнутих провідників (кілець) і т.п.;

3) металізовані вуглецеві і полімерні волокна, тканини, плівки, макросферу;

4) магнітні наповнювачі - ферити різного хімічного складу (переважно магнітном'які), а також магнітні порошки металів і аморфних сплавів (Fe, Ni, сплави FeCoNi і ін.);

5) дисперсні напівпровідники - оксиди, карбіди і сульфідні металів, карбід кремнію, сегнетокераміки, обвуглені кремній органічні тканини і волокна;

6) діелектрики, зокрема, легко поляризовані органічні речовини (солі ретиніт Шиффа), біополімери (хітин) і т. п.

Найбільш ефективні широкодіапазонні НВЧ поглиначі, як правило, містять змішані наповнювачі, які забезпечують різні механізми втрат електромагнітної енергії.

Перспективними полімерними композитними РПМ є [9-15]:

- неткані волокнисті матеріали;
- матеріали, що містять воду або вод розчини солей;
- РПМ на основі біорозкладаних компонентів природного походження;
- матеріали на основі полімерів з провідністю і т. д.

Електромагнітні екрани. під екрануванням розуміється захист радіотехнічного і електронного обладнання від дії зовнішніх полів, а також

локалізується ЕМП і ЕМІ, що перешкоджає проявленню цих випромінювань у навколишньому середовищі. Екранування ЕМП і ЕМІ є основами електромагнітної екології, електромагнітної сумісності та електромагнітної безпеки.

Властивість ЕМІ поглинати енергію НВЧ випромінювання характеризують такими найюільш часто вживаними кількісними параметрами:

- модулем коефіцієнта відбиття R при падінні плоскої ЕМВ на поверхню ЕМІ (при різних кутах падіння в широкій смузі частот);
- питомої поглинаючої потужністю ЕМІ P ($\text{Вт} / \text{см}^2$);
- рівнем ослаблення енергії ЕМВ при її проходженні через ЕМІ (ефективністю екранування $E_{\text{екр}}$) по електричному (ee) і магнітного (EH) полях:

$$ee = 201g (E1 / E2) (\text{дБ});$$

$$EH = 201g (H1 / H2) (\text{дБ}) \quad (2)$$

де $E1$, $H1$ і $E2$, $H2$ - напруженості електричних і магнітного полів в даній точці простору при відсутності радіопоглинаючого екрану і при його наявності відповідно.

Величину R вимірюють методами рефлектометрії, тобто шляхом аналізу відбитого від поверхні ЕМІ НВЧ сигналу. Ці методи забезпечують достатню точність і надійність вимірювань. Для визначення величини R аналізують електромагнітні параметри:

(А) стоячої хвилі, що утворюється в хвильоводах і коаксіальних лініях в результаті інтерференції нормально падаючої на зразок і відбитої ЕМВ;

(Б) відбитого сигналу при різних кутах падіння на зразок плоскої ЕМХ у вільному просторі.

До непрямих параметрах, які дозволяють судити про ступінь поглинання НВЧ випромінювання зразком РПМ, відносяться властиві матеріалу екрану діелектричні і магнітні втрати.

З цією метою, як правило, застосовують резонаторні методи.

Ефективність екранування ($E_{\text{екр}}$) - це ступінь ослаблення складових поля

(електричної або магнітної), що визначається як відношення діючих значень напруженості полів в даній точці простору при відсутності і наявності ЕМІ. Головним фактором, що визначає якість екрану, є радіофізичні властивості матеріалу, з якого виготовлений ЕМІ, а також його конструкційні особливості.

При розгляді $E_{\text{екр}}$ дослідники часто застосовують наближений аналіз, заснований на поданні $E_{\text{екр}}$ як суми окремих складових (формула 3):

$E_{\text{екр}} = E_{\text{погл}} + E_{\text{отр}} + E_{\text{рас}}, \quad (3)$ де $E_{\text{погл}}$, $E_{\text{отр}}$ і $E_{\text{рас}}$ - величини поглинанням екраном енергії ЕМІ за механізмами магнітних, діелектричних втрат, її відображення на кордоні екрану з атмосферою і розсіювання внаслідок багаторазових внутрішніх перевідбиттів на міжфазних поверхностях композиту.

До теперішнього часу сформувалася широка номенклатура ЕМІ різноманітних конфігурацій і структури. У них використовуються різні типи сполучної і ФН, які відрізняються по фізикохімічним і структурним характеристикам, аж до унікальних (солі ретиніт Шиффа, біополімери (хітин), сегнетомагнетикі, нанотрубки на основі фулеренів, а також електропровідні полімери - поліанілін і поліпіррол). Проте до цих пір не існує універсального високоефективного поглинача енергії ЕМІ в широкій смугі НВЧ при задовільних розмірних, фізикомеханічних та інших експлуатаційних характеристиках.

Введення полімерних сполук до складу композитних ЕМІ дозволяє знизити питому масу конструкцій, впровадити високотехнологічні продуктивні методи полімерних композитів в виробі (екструзію, лиття під тиском, термічне пресування і ін.), підвищити якість і спростити технологію формування матеріалів, використовуючи методи електростатичного напилення, «гарячої» накатки, отримувати пластичні і високоеластичні обшивки, добре поєднуються з криволінійними поверхнями складної форми, змінювати структуру і конфігурацію ЕМІ в широких межах, забезпечити необхідний комплекс їх фізико механічних, фізикохімічних і інших експлуатаційних характеристик з мінімальними витратами.

Застосування ЕМІ дозволяє вирішувати багато завдань, серед яких захист інформації в приміщеннях і технічних каналах, електромагнітна сумісність обладнання та приладів при їх спільному використанні, захист персоналу від підвищеного рівня ЕМІ і забезпечення сприятливої екологічної обстановки навколо працюючих електроустановок і НВЧ пристроїв.

Маючи здатність ефективно поглинати енергію ЕМП в широкому діапазоні НВЧ, ЕМІ повинні відповідати ряду інших технічних вимог, серед яких низька питома маса, технологічність при виготовленні, невисока вартість готових виробів, екологічна чистота, прийнятні тепло і електрофізичні, фізико механічні і ін. характеристики, стабільність розмірів, теплова і хімічна стійкість в умовах експлуатації, надійність, довго вічність і т. п.

Рівень цих вимог зазвичай чітко визначений, оскільки ЕМІ розробляються під конкретну задачу.

Таким чином, можливості створення високоефективних сучасних ЕМІ визначають нові класи матеріалів з унікальними властивостями, які використовуються в якості компонентів термопластичних композитів.

Композиційні РПМ і ЕМІ є ефективним засобом вирішення проблем електромагнітної безпеки і електромагнітної екології. Перспективними серед них являють композиційні матеріали на основі термопластичних сполук. як ФН можуть бути використані як класичні (порошки металів і магнітнотвердих феритів, оксиди, карбіди і сульфідні металів, вуглецеві та металеві волокна і т. д.), так і унікальні (біополімери, сегнетомагнетики, нанотрубки на основі фулеренів, енантіоморфні структури, полімери з власною провідністю і ін.)

РОЗДІЛ 2: ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ

Електронна мікроскопія за допомогою електронного мікроскопа дозволяє дослідити мікроструктуру тіл при збільшеннях до багатьох сотень тисяч разів (також до атомно-молекулярного рівня), вивчити їх локальний склад і локалізовані на поверхнях або в мікрооб'ємах тіл електричні і магнітні поля

Використання растрової розгортки електронного променя по поверхні зразка є одним із способів автоматизації вимірювань. За своїми можливостями Растрова електронна мікроскопія (РЕМ) є продовженням оптичної мікроскопії, що розширює її можливості при дослідженні топології різних поверхонь кристалічних матеріалів. Дозвіл поширених РЕМ становить 5-10 нм при 0,6-0,8 мм, яка недосяжна для інших видів мікроскопів, причому при вивченні топології поверхні цілком достатньо використання низьковольтних РЕМ з діаметром пучка електронів 10 мкм. Дуже часто використовують пучок електронів з енергією 10-30 кеВ, але в окремих випадках можуть використовуватися електрони з енергією в декілька сотень еВ. У РЕМ зображення об'єкта формується послідовно по точках і є результатом взаємодії електронного пучка (зонда) з поверхню зразка. Кожна точка зразка послідовно опромінюється сфокусованим електронним пучком. Потім він переміщається по досліджуваній поверхні як сканування електронного променя в телевізійних системах. При взаємодії електронів зонда з речовиною виникають відповідні сигнали різної фізичної природи (відображені і вторинні електрони, рентгенівське випромінювання, світло, поглинений струм та ін.

Завданням дипломної роботи було провести дослідження трьох зразків, дослідити їх структуру, яка впливає на електричні властивості і обрати найбільш підходящий

Перевагою РЕМ є можливість проводити дослідження зразків без попередньої підготовки поверхні.

2.1. ЕЛЕКТРОННИЙ МІКРОСКОП

В електронному мікроскопі замість світла для побудови зображення використовується потік електронів у вакуумі. Як «лінзи», що фокусують електрони, служить електромагнітне поле, яке створюється електромагнітними котушками. Зображення в електронному мікроскопі спостерігають на флюорисцентному екрані та фотографують. Об'єкти при електронній мікроскопії знаходяться в глибокому вакуумі, там вони піддаються фіксації і спеціальній обробці. Крім того, вони повинні бути дуже тонкими, так як потік електронів сильно поглинається об'єктом. У зв'язку з цим в якості об'єктів використовують ультратонкі зрізи товщиною 20-50нм, що вміщені на найтонші плівки. Роздільна здатність мікроскопів значно вища ніж світлових і досягає 1,5 А (0,15 нм), що дозволяє отримати корисне збільшення в мільйони разів.



Рисунок 2.1.Скануючий електронний мікроскоп

Найбільш широко застосовується просвічуюча та скануюча електронна мікроскопія.

Просвічуюча електронна мікроскопія застосовується для вивчення ультратонких зрізів мікробів, тканин, а також будови дрібних об'єктів (вірусів, джгутиків.ін.). Скануюча електронна мікроскопія застосовується для вивчення поверхні об'єктів.

Електронномікроскопічний метод дослідження набув широко поширений в різних областях науки і техніки. Електронний мікроскоп завдяки високій

роздільній здатності (більш ніж на два порядки вище в порівнянні зі світловим мікроскопом) дозволяє спостерігати різні нюанси і деталі структури мікрооб'єктів на атомномолекулярному рівні. Ці прилади за своїм призначенням поділяються на скануючі (SEM) і растрові (REM) електронні мікроскопи. Перші дозволяють вивчати зразки тонки об'єктів за допомогою пучка електронів, що проходять через них, а другі - у вторинних або розсіяних об'єктах електронах.

Растровий електронний мікроскоп і рентгенівський мікроаналізатор це два прилади з великими можливостями, які дозволяють на такому рівні спостерігати і вивчати неоднорідні органічні і неорганічні матеріали та поверхні. В обох приладах досліджувана область або аналізований мікрооб'єкт опромінюються тонко сфокусованим електронним пучком, або нерухомим, або розгортається в растровій поверхні зразка. Метод скануючої електронної мікроскопії (SEM) застосовується для характеристики структури поверхонь матеріалу. Взаємодія електронів сфокусованого пучка з атомами зразка призводить не тільки до їх розсіювання, яке використовується, щоб отримати зображення в просвічуючих електронних мікроскопах, а й до появи різних вторинних явищ (вторинна електронна емісія, гальмівне рентгенівське випромінювання, характеристичне рентгенівське випромінювання, катодоліумінесценція, проходження і поглинання електронів), що несуть інформацію про властивості поверхні матеріалу. Енергія і глибина виходу вторинних частинок визначаються їх природою, властивостями матеріалу та енергією первинних електронів. Для створення зображення в SEM найбільш часто реєструються пружно розсіяні первинні електрони або вторинні електрони. У SEM зображення поверхні у вторинних частинках створюється завдяки розгортці сфокусованого пучка електронів по поверхні досліджуваного зразка. Пучок необхідного діаметра безперервно оббігає деяку ділянку зразка аналогічно променю, оббігає екран телевізійної трубки. Електричний сигнал, що виникає при бомбардуванні об'єкта електронами пучка, використовується для формування зображення на екрані телевізійного кінескопа або електронно-променевої трубки, розгортка якої синхронізована з системою відхилення електронного пучка. Так контраст, що виникає при реєстрації відбитих, тобто

пружно розсіяних і вторинних електронів, в основному, пов'язаний з кутом падіння електронів на зразок, то на зображенні виявляється поверхнева структура. Взаємодія електронів сфокусованого пучка з атомами зразка поряд з відбитими і вторинними електронами призводить до появи рентгенівського випромінювання, що виникає за рахунок непружних втрат енергії електронів зонда. Рентгеноспектральний мікроаналіз- визначення елементного складу мікрооб'єктів, що порушують в них характерне рентгенівське випромінювання. Для аналізу характеристичного спектра в рентгеноспектральних мікроаналізаторах (РСМА) використовують кристал-аналізатор. При взаємодії електронного зонда із зразком одним з порушуваних сигналів є характеристичне рентгенівське випромінювання. При проникненні первинних електронів в зразок вони гальмуються не тільки електричним полем атомів, але й безпосереднім зіткненням з електронами атомів матеріалу. В результаті цього первинні електрони можуть вибивати електрони з внутрішніх К-, L- або М-оболонки, залишаючи атом зразка в енергетично збудженому стані. Утворені вакансії заповнюються електронами, які перейшли з більш високих енергетичних рівнів. Атом переходить в основний стан, надлишкова енергія виділяється у вигляді кванта рентгенівського випромінювання. Оскільки енергія виникнення кванта залежить тільки від енергії, що бере участь в процесі електронних рівнів, а вони є характерними для кожного елемента, виникає характеристичне рентгенівське випромінювання. Так як кожен атом має цілком певне кінцеве число рівнів, між якими можливі переходи тільки певного типу, характеристичне рентгенівське випромінювання дає дискретний лінійчатий спектр. Рентгенівські лінії, що виникають при переходах електронів на однойменну оболонку, складають одну спектральну серію (К-, L-, М-серії). Згідно із законом Мозлі, для рентгенівських ліній всередині однієї серії існує пряма залежність енергії випромінювання і атомного номера хімічного елемента: $E = p (Z - q)^2$, де E - енергія, Z - атомний номер емітує атома (q - константи). Кількісний аналіз елементів проводиться виміром інтенсивності ліній характеристичного спектра беруть участь елементів (як правило, α - ліній).

Схема растрового електронного мікроскопа, призначення його вузлів і їх функціонування

Схема растрового електронного мікроскопа приведена на рис. 3. Він складається з наступних основних вузлів: електронної гармати 1 ... 3,; електроннооптичної системи 4 ... 10, яка формує електронний зонд і забезпечує його сканування на поверхні зразка 12; системи, яка формує зображення 11 ... 17.

РЕМ має вакуумну камеру (рис. 4), яка служить для створення необхідного розрядження ($\sim 10^3 \text{ Па}$) в робочому обсязі електронної гармати і електроннооптичної системи. Складовими частинами мікроскопа є механічні вузли (шлюзи, гоніометричний стіл і т.д.), що забезпечують установку і переміщення зразка.

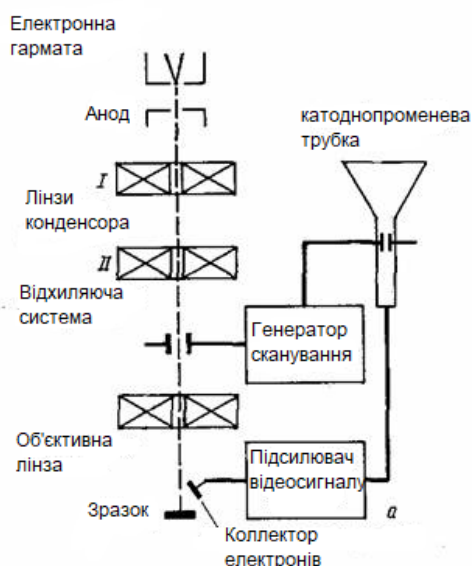


Рисунок 2.2 - Принципова схема растрового електронного мікроскопа.

Растровий електронний мікроскоп

Принципово ідея побудови електронного мікроскопа була сформульована в 1935 році М.Кнолем (ідея оптичного скануючого мікроскопа була раніше висловлена і реалізована одним з творців сучасного телебачення В.К.Зворикіним в 1924 році). Зображення об'єкта формується послідовно по точках і є результатом взаємодії електронного пучка з поверхнею зразка. Кожна точка зразка послідовно опромінюється сфокусованим електронним пучком, який переміщається по досліджуваній поверхні подібно скануванню електронного променя в телевізійних системах.

При взаємодії електронів зонда з речовиною виникають відповідні сигнали різної фізичної природи (відображені і вторинні електрони, Оже-електрони, рентгенівське випромінювання, світло, поглинений струм та ін.), які використовуються для синхронної побудови зображення на екрані монітора. На рис.2.3 представлена схема утворення вторинних сигналів під впливом електронного зонда. Для формування зображення не використовується електронно-оптична система. Зміна масштабів зображення може здійснюватись радіотехнічними засобами.

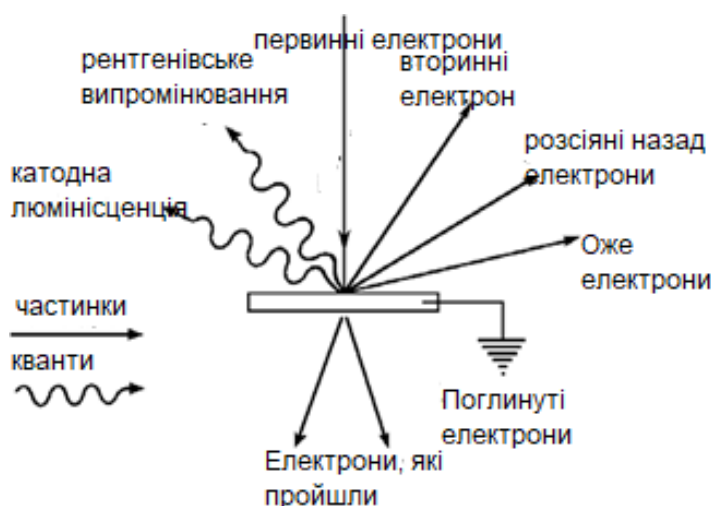


Рис. 2.3.. Схема утворення вторинних сигналів при взаємодії електронів зонда з речовиною мішені.

Тому растрові електронні мікроскопи (РЕМ) принципово відрізняються від мікроскопів.

Незважаючи на гадану простоту ідеї, висловленої М.Кнолем, здійснити її у вигляді надійного приладу з достатнім для практичної роботи дозволом виявилось дуже складно через обмеження технічних можливостей того часу. Перші діючі прилади були створені в 1939 і в 1942 роках (Зворикін) [2-4]. Проте широке використання РЕМ в науці і техніці стало можливо лише в 70-і роки, коли з'явилися високо надійні прилади, які були створені на основі досягнень мікроелектроніки та обчислювальної техніки [5-11].

2.2. ПРИЛАД І ПРИНЦИП РОБОТИ РЕМ

Растровий електронний мікроскоп є вакуумним приладом, так як при нормальному атмосферному тиску електронний пучок сильно розсіюється і поглинається, що унеможлиблює його фокусування. Тому робочий вакуум в камері мікроскопа повинен бути 10^{-5} тор., або краще. На рис.2.4 зображена схема основних вузлів реєстрового мікроскопа. Електронний пучок від джерела електронів завдяки спеціальній конденсорній системі формується у вигляді сфокусованого зонда і проходить через систему керуючих електродів або електромагнітів, що переміщують пучок по поверхні зразка по траєкторії, що утворює растр, аналогічний телевізійному растру [5-6].

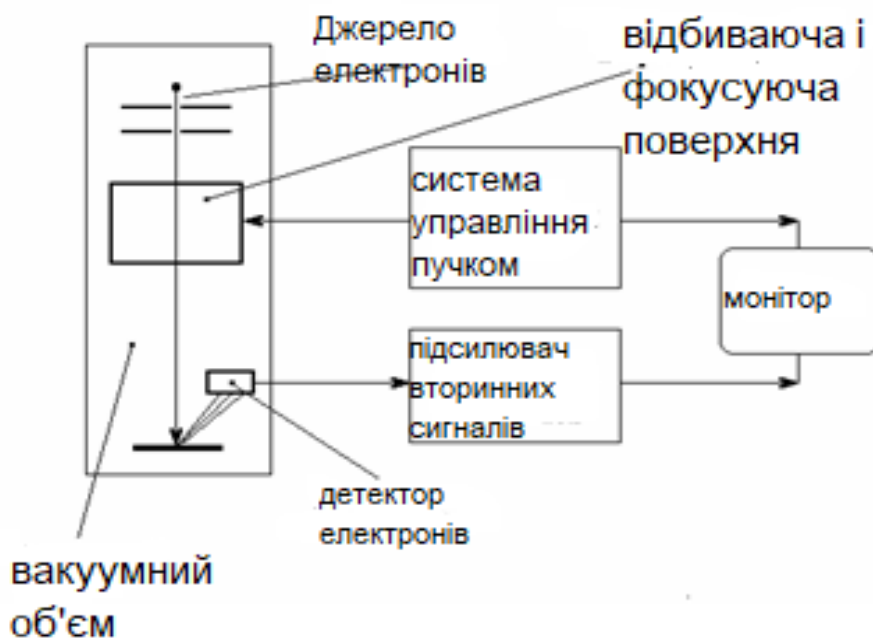


Рис.2.4. Спрощена схема, що ілюструє роботу РЕМ.

Переміщення зонда по поверхні зразка має відбуватися з дуже високою точністю і буде, в кінцевому рахунку, поряд з розміром зонда, визначати величину дозволу приладу. В результаті взаємодії пучка електронів з поверхнею зразка виникає відповідна реакція, яка реєструється відповідними датчиками. Реєстрований датчиками сигнал використовується в подальшому для модуляції яскравості електронного пучка в електронно-променевої трубки монітора. Величина цього вторинного сигналу буде залежати від

фізичних властивостей поверхні зразка і може змінюватися від точки до точки. В результаті на екрані монітора утворюється зображення поверхні зразка, що відображає топографію відповідного фізичного властивості досліджуваного зразка. Таким чином можна досліджувати топографію неоднорідностей дефектів і стану поверхні: наприклад, топологію поверхні (межі зерен, пори, тріщини, неоднорідності складу та ін.) - в відображених або вторинних електронах; розподіл елементного складу по поверхні зразка - в характеристичний рентгенівському випромінюванні; розподіл донорних або акцепторних центрів - за величиною поглиненої струму; топографію магнітної доменної структури - у вторинних електронах і ін.

Коефіцієнт збільшення зображення в РЕМ визначається відношенням лінійних розмірів раstra, що освітлюється зондом, на поверхні зразка d і на екрані монітора D ,

тобто

$-D / d$. Дозвіл, що досягається в РЕМ, обмежена ефективним розміром елемента

зображення, або, іншими словами, розміром області в зразку, порушуємо електронним зондом, що має діаметр dz . З іншого боку величина струму сфокусованого електронного пучка, що взаємодіє з поверхнею зразка, визначає інтенсивність вторинних сигналів. Тому електронно-оптична система, що формує зонд, повинна забезпечувати отримання максимально можливого струму при мінімально можливому розмірі зонда.

2.2.1. ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ЗОНДА

Електронна гармата складається з джерела електронів (вольфрамовий катод; катод з гексаборид лантану LaB6; автоемісійний катод), модулятора (циліндра Венельта) і анода. Модулятор зазвичай знаходиться під більш негативним (на кілька сотень вольт) потенціалом по відношенню до катода, що дозволяє сфокусувати електронний пучок в області, розташованої за

модулятором, з діаметром d_0 і відхиленням α_0 і званої кросовером.

На рис 2.5 показана схема електронної звичайної гармати.

Типові значення d_0 і α_0 для електронних гармат, використовуваних в рентгенівських мікроаналізаторах і растрових електронних мікроскопах, складають

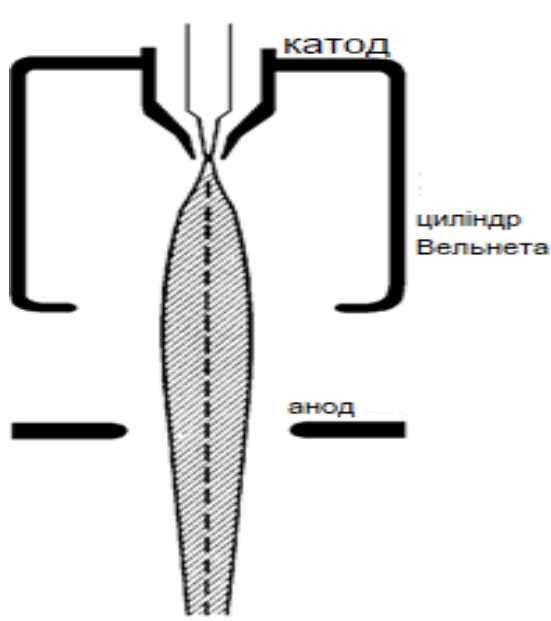


Рис..2.5 Схема пристрою електронної гармати.

Для отримання достатнього дозволу зазвичай необхідно зменшити розміри зонда до величини $50\text{\AA} \div 1\text{мкм}$, тобто в 10000 разів, при цьому істотно зменшується струм пучка до 0.01на.

Зменшене зображення кросовера в подальшому формується конденсорною системою мікроскопа, яка може складатися з однієї або декількох лінз, причому остання лінза, що формує мінімальну «пляму» зонда на поверхні об'єкта, називається об'єктивною лінзою.

Якщо аберації в конденсорною системі повністю відсутні, можна показати, що мінімальний роз

$$d = \sqrt{\frac{i}{B\alpha^2}},$$

буде мати вигляд:

$$B = (0.62\pi / 4) \cdot \left(\frac{eV_0}{kT} \right) \cdot J_0$$

З наведеного співвідношення видно, що для збільшення струму пучка при постійному діаметрі зонда необхідно збільшувати апертуру електронного

пучка. Ситуація істотно ускладнюється при обліку аберацій лінз, так як збільшення апертури буде приводити до додаткового розмиття пучка, і, тому, збільшення апертури завжди обмежене, а отже обмежений і струм зонду. У загальному випадку при обліку дифракційної, сферичної і хроматичної помилок ефективний мінімальний діаметр зонда визначається співвідношенням

$$d_z = \sqrt{d_0^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_d^2}$$

$$d_z = \sqrt{\left[\frac{i}{B} + (1.22\lambda)^2 \right] \cdot \frac{1}{\alpha^2} + (0.5C_s)^2 \cdot \alpha^6 + \left(\frac{\Delta E}{E_0} \cdot C_c \right)^2 \cdot \alpha^2}$$

Підставляючи сюди відповідні величини аберацій, отримаємо

(3)

Наведене рівняння можна досліджувати на екстремум, продиференціювавши його по α ,

і визначити мінімальну величину діаметра зонда і максимальний струм зонда

$$d_{\min} = 1.29C_s^{1/4} \cdot \lambda^{3/4} \left[7.92(iT/J_0) \cdot 10^9 + 1 \right]^{3/8},$$

$$i_{\max} = 1.26 \cdot (J_0/T) \cdot \left[\left(0.51d^{8/3} / C_s^{2/3} \cdot \lambda^2 \right) - 1 \right] \cdot 10^{-10},$$

$$\alpha_{opt} = (d/C_s)^{1/3}$$

$$I_z \sim d_z^{8/3}$$

З отриманих співвідношень видно, що струм пучка зонда пропорційний діаметру зонда в ступінь 8/3. Тоді як величина вторинних сигналів (емісія вторинних електронів, генерація рентгенівського випромінювання, катодолюмінесценція і ін. ефекти) пропорційна величині струму зонда і, отже, покращуючи дозвіл, ми будемо знижувати чутливість методу.

Є кілька способів збільшення струму зонда. Спочатку можна збільшувати прискорюючу напругу, знижуючи довжину хвилі електронів, з іншого - необхідно зменшувати аберації лінз і іакож сферичну аберацію. Також є способи збільшення щільності струму шляхом переходу на катоди з

гексаборид лантану. Однак слід мати на увазі, що всі ці заходи мають природне обмеження, яке пов'язане з тим, що в результаті взаємодії електронів пучка з матеріалом зразка можна побачити помітне збільшення області, в якій генеруються вторинні сигнали в порівнянні з діаметром зонда. Тому роздільна здатність в РЕМ визначається в першу чергу не діаметром зонда, а розмірами області, в якій відбувається генерація вторинних ефектів.

2.2.2. ДЕТЕКТОРИ ВТОРИННИХ СИГНАЛІВ У РЕМ

Оцінки, зроблені вище, показують, що при діаметрі зонда 100\AA його струм становить дуже малу величину, близько 0.01на . Навіть якщо припустити, що коефіцієнт вторинної емісії дорівнює одиниці, ток вторинних електронів складе лише $0,01\text{на}$. Це призводить до необхідності реєструвати в РЕМ такі слабкі сигнали, що, в свою чергу, є складним технічним завданням [5-11].

Сцинтиляційний детектор. Найбільш широке поширення в РЕМ для реєстрації вторинних електронів отримали сцинтиляційні детектори. Пристрій цього детектора показано на рис.5.4. Вторинні сцинтилятор, що перетворюють енергію електрона в світловий імпульс перетворюється в фотострум і потім посилюється фотоелектронним помножувачем. Між сцинтилятором і фотоелектронним помножувачем поміщається світловод, який дозволяє вивести фотоумножувач. Його робота вкрай чутлива до зовнішніх електричних і магнітних полів, за межі вакуумної камери РЕМ. Завдяки тому що більшість використовуваних сцинтиляторів генерують світло під дією електронів з енергією більше 10кеВ , на його зовнішню поверхню наноситься тонкий напівпрозорий металевий шар і на нього подається позитивна напруга близько 12кВ для збору і прискорення низькоенергетичної частини спектра (істинно) вторинних електронів. Щоб виключити вплив цього електричного поля на первинні електрони зонда, сцинтилятор поміщається всередину циліндра Фарадея, на який подається

напруга порядку декількох десятків вольт ($-50 \div +250\text{В}$), причому невеликий позитивний потенціал використовується для збору низькоенергетичних електронів. Вони потрапляючи всередину циліндра, прискорюються додатковим потенціалом, наявним на поверхні сцинтилятора. Негативна напруга на колекторі повністю замикає вхід детектора для низькоенергетичної частини вторинних електронів, дозволяючи спостерігати контраст тільки в відображених електронах. Детектор в такому вигляді отримав назву детектора Еверхарт-Торнлі. Слід підкреслити, що ефективність збору низькоенергетичних електронів буде вище, ніж для високоенергетичних. Це стає зрозумілим з рис.2.6 Кут збору електронів низькоенергетичної частини спектра збільшується за рахунок позитивного потенціалу колектора. Для відбитих електронів кут збору визначається тільки розміром вхідного кута детектора, і його відстанню до зразка.

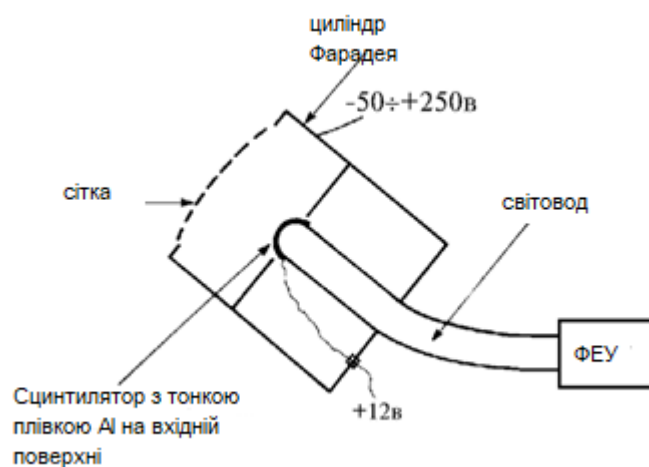


Рис.2.6.. Схема пристрою детектора Еверхарт-Торнлі.

Також необхідно підкреслити, що матеріал сцинтилятора може деградувати за рахунок накопичення радіаційних дефектів під дією електронів, що подають на нього і погіршується ефективність детектора, і вимагають періодичної заміни.

Напівпровідниковий детектор. Вторинні електрони, які потрапляють в матеріал напівпровідника поблизу рп-переходу, народжують в ньому електронно-діркові пари, що призводить до появи струму в ланцюзі рп-переходу. Цей струм буде пропорційний кількості електронів, поглинених в монокристалі напівпровідника. Для отримання достатньої величини сигналу

струм в подальшому посилюється спеціальними підсилювачами.

Електрони повинні мати енергію, яка достатньою для утворення електронно доручених пар, тому напівпровідниковий детектор (НПД) зазвичай використовується для реєстрації високоенергетичної частини вторинних електронів. Так як рп-перехід може мати значну площу, ефективність збору та реєстрації відбитих електронів за допомогою НПД вище, ніж для детектора Еверхарт-Торнлі

Детектор випромінювання катодолюмінісценції. Кількість світла, яка випускається мішенню під дією електронів зонда низька, тому для збільшення ефективності збору світлових квантів використовують спеціальні дзеркала, які виготовляють у вигляді половини еліпсоїда обертання, в один з фокусів якого поміщають мішень, а в іншій - світловод - приймач, що веде світло за межі вакуумної камери мікроскопа. Після цього світло реєструється або інтегральним детектором-фотоелектронним помножувачем, або спектрометром, що дозволяє досліджувати розподіл випромінюваного зразком світла по довжинах хвиль. У дзеркалі є отвір для пропускання електронного пучка - зонда, що направляється на зразок.

Реєстрація рентгенівського випромінювання. Для реєстрації рентгенівського випромінювання існує два типи систем. По-перше, застосовуються кристал- дифракційні спектрометри з вигнутими для збільшення світлосили кристалами-аналізаторами. Приймачем рентгенівського випромінювання зазвичай служить сцинтиляційний детектор.

Енергодисперсійного детектори мають нижчий енергетичний дозвіл (100-150ев) в порівнянні з кристал-дифракційними спектрометрами (менше 10ев), але завдяки одночасній реєстрації всього спектра без будь-яких переміщень зразка і детектора і можливості його швидкої обробки на ЕОМ ці детектори отримали дуже широке поширення.

2.3. ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА З РЕЧОВИНОЮ

При попаданні електронів зонда на поверхню мішені-зразка відбувається безліч досить складних явищ, пов'язаних з передачею енергії електронів пучка речовини мішені [5,11-15]. У першому наближенні всі ці явища можна розділити на дві великі групи: пружне розсіювання, пов'язане зі зміною траєкторій електронів при малій втраті енергії; неупруге розсіювання, обумовлене непружним взаємодією з ядрами атомів, і непружним взаємодією зі зв'язаними електронами. Для опису взаємодії потоку частинок з речовиною зазвичай використовують такі два поняття - перетин взаємодії і довжина вільного

пробігу частинок. Перетин взаємодії визначається, як $\sigma = n/n_m * n_0$, а довжина вільного пробігу $\gamma = \frac{A}{N\rho\sigma}$

Де n - число зіткнень в одиниці об'єму; n_m - число атомів в одиниці об'єму мішені; n_0 - число падаючих частинок в одиницю часу; ρ - щільність; A - атомна вага; N_0 - число Авагадро.

2.3.1 ОСНОВНІ МЕХАНІЗМИ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОНІВ

Пружне розсіювання електронів, як правило, виникає в результаті кулонівської взаємодії електронів з полем ядра - це так зване Резерфордське розсіювання, і використовується, як правило, на кути порядку десятків градусів. Перетин розсіювання залежить від кута розсіювання ϕ і атомного номера Z і описується формулою Резерфорда

$$\sigma_r = 1.62 \cdot 10^{-20} \cdot \left(\frac{Z}{E} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \right)^2$$

Також можливим є процес багаторазового розсіювання на малі кути в результаті взаємодії електронів з електронним хмарою атома. У кожному акті розсіювання електрон відчуває незначне відхилення, проте після декількох актів взаємодії електрон може істотно змінити напрямок руху практично на зворотній. Ймовірності механізмів першого або другого типу розсіювання сильно залежать від матеріалу мішені і енергії падаючого пучка електронів.

Непружне розсіювання електронів в матеріалі мішені відбувається в результаті безлічі механізмів, таких як, збудження електронного газу решітки (плазмони), збудження електронів провідності (вторинні електрони, наведений струм), іонізація внутрішніх електронних оболонок атома (Оже-електрони і характеристичне рентгенівське випромінювання), порушення гальмівного рентгенівського випромінювання, збудження фотонів (катодолюмінесценція) та ін.

Процес втрат енергії електронами пов'язаний з багаторазовими актами їх взаємодії з кулоновськими полями ядер і електронами атомних оболонок і носить багатоступінчастий характер. Опис траєкторій електронів в таких багаторазових випадкових актах зазвичай проводиться в рамках методу Монте-Карло.

Розрахунок втрат енергії електронів в мішені в припущенні безперервності втрат вперше був зроблений Бете на основі квантової теорії. Остаточне вираз для швидкості втрат енергії електронів має вигляд

$$-\frac{dE_m}{dX} = 2\pi e^4 N_0 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{\rho}{E_m} \ln\left(\frac{1.166 E_m}{J}\right),$$

тут E_m - середня енергія електронів, e - заряд електрона, ρ - щільність речовини, Z - атомний номер, A - атомна вага, N_0 - число Авагадро. Параметр J - отримав назву середнього потенціалу іонізації елемента і дорівнює

$$J = (9.76Z + 58.5Z^{-0.19}) \cdot 10^{-3} \text{kev}$$

Щоб описати середні втрати енергії іноді використовують ще вираз середньої гальмівної здатності, яка визначає середні втрати енергії на одиницю довжини і одиницю щільності, тобто на одиницю масової товщини. Знаючи середні втрати, можна легко визначити повну довжину пробігу електрона в мішені, яка буде складатися з ділянок траєкторій між кожними двома сусідніми по часу актами взаємодії. Канайо і Окаяма було пораховано вираз для повної довжини пробігу з урахуванням повного перетину розсіювання, що враховує як пружні, так і непружні акти взаємодії, і має вигляд

$$R = 0.0276 \cdot E^{1.67} \cdot \left(\frac{A}{Z^{0.889} \rho} \right)$$

Якщо в цій формулі E задається в кев, A - г/моль, а ρ в г/см^3 - розрахункова повна довжина пробігу електронів в мішені буде виражена в $\mu\text{м}$. Слід підкреслити дві обставини: по-перше, повна довжина пробігу не збігається з глибиною проникнення електрона в мішень; по-друге, наведені формули дуже наближені і можуть дати лише грубі оцінки цих величин.

Розглянемо трохи докладніше основні механізми взаємодії електронного пучка з речовиною мішені.

2.3.2 ОСНОВНІ ДЖЕРЕЛА СИГНАЛІВ, ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В РЕМ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ

Відображені електрони. Відображені електрони_ можуть виникати як в результаті однократного пружного відбиття, так і в актах малокутового багаторазового розсіювання. Оцінки показують, що для енергії падаючих електронів $10 \div 30$ кев і мішеней, що містять легкі елементи (з малим атомним номером), трохи більше половини всіх відображених електронів народжується в результаті багаторазових малокутових актів взаємодії. Для важких елементів ситуація змінюється навпаки. Наявність такого зв'язку між струмом відбитих електронів і атомним номером елемента дозволяє при певних умовах якісно оцінювати елементний склад приповерхневого шару зразка.

Як зазначалося вище, частина відбитих електронів утворюється в результаті однократного акту - пружного розсіювання, інша частина може виникнути в результаті багаторазових актів розсіювання на малі кути, і, нарешті, можуть бути електрони, що утворилися в результаті спільної дії двох цих процесів - електрон витрачає частину енергії на непружні зіткнення і, нарешті, відбивається пружно, але вже з меншою енергією [12,13]. Як показують спеціальні оцінки, зроблені на підставі розрахунків розсіювання за методом Монте-Карло, і відповідні експерименти, з ростом атомного номера елементів мішені зростає частка електронів, розсіяних переважно по пружності механізму. Однак завжди є значна частина електронів, що проникла всередину мішені і розтраті частину енергії на непружні взаємодії. Такі

електрони також мають можливість покинути зразок у вигляді відбитих електронів, що зменшується з ростом глибини. При цьому область взаємодії електронів зонда розширюється під поверхнею зразка. Якщо падаючий пучок електронів добре сфокусований і має практично нульове поперечний переріз, відображені електрони залишають поверхню мішені з області, діаметр якої приблизно дорівнює довжині пробігу електронів в мішені. Розподіл кількості електронів в цій області має вигляд дзвони, причому найбільша частина електронів зосереджена всередині області $0.5R$. Тому дозвіл скануючого мікроскопа в відображених електронах зазвичай оцінюється цією величиною.

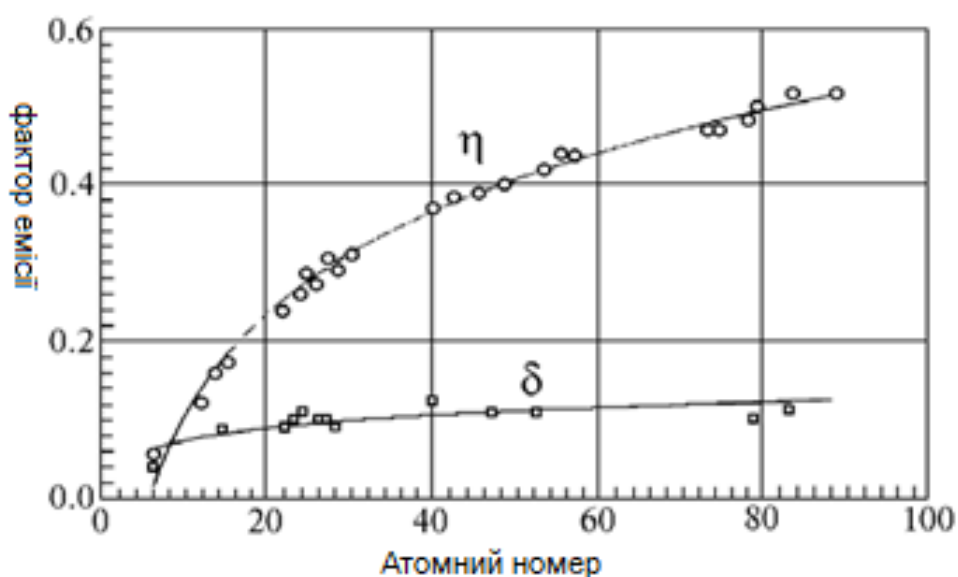


Рис. 2.7. Залежність коефіцієнта емісії електронів від атомного номера елементів мішені.

η - коефіцієнт відбиття.

Коефіцієнт відбиття електронів залежить від кута нахилу мішені по відношенню до пучка зонда. Якщо збільшити кут нахилу коефіцієнт відображення η зростає. Кутовий розподіл відбитих електронів залежить від кута падіння: при нормальному падінні

воно симетрично; зі збільшенням кута з'являється яскраво виражена асиметрія в напрямку первинного пучка.

Вторинні електрони. Вторинними електронами зазвичай називають електрони, емітовані мішенню при бомбардуванні її первинним електронним пучком. Вони мають безперервний енергетичний спектр від 0 до енергії електронів зонда - E_z і складаються з пружно і непружно відбитих електронів і істинно вторинних електронів, що утворилися в процесі взаємодії електронів зонда з електронами зони провідності. Нижче піде мова тільки про істинно вторинних електронах, які в растрової електронної мікроскопії отримали назву просто вторинних електронів. Такі електрони мають енергію істотно менше 50ев. На рис.5.6 показано розподіл по енергії електронів, що залишають поверхню зразка в результаті впливу на неї електронів зонда. Високоенергетична частина спектра представляє тут пружно і непружно відображені електрони. У низькоенергетичної частини спектра ($5 \div 10 \text{ев}$) є гострий і дуже яскравий пік - це і є вторинні електрони. Коефіцієнт емісії вторинних електронів визначається, як

$$\delta = \frac{n_s}{n_z} = \frac{i_s}{i_z} = \delta_s + \eta_e + \eta_{ne}$$

де n_s , i_s - число або струм вторинних електронів, n_z , i_z - число або струм електронів зонда, η_s - коефіцієнт істинно вторинних електронів, η_e - коефіцієнт розсіювання пружно відбитих електронів, η_{ne} - коефіцієнт розсіювання непружно відбитих електронів.

Наслідком низької енергії вторинних електронів є їх мала глибина виходу. Для того щоб залишити поверхню мішені,

електрон повинен подолати енергетичний бар'єр, який дорівнює роботі виходу, яка становить зазвичай кілька електрон-вольт. Тому ймовірність виходу вторинних електронів різко зменшується зі збільшенням глибини. Це не означає, звичайно, що вторинні електрони генеруються тільки в тонкій приповерхностній області.

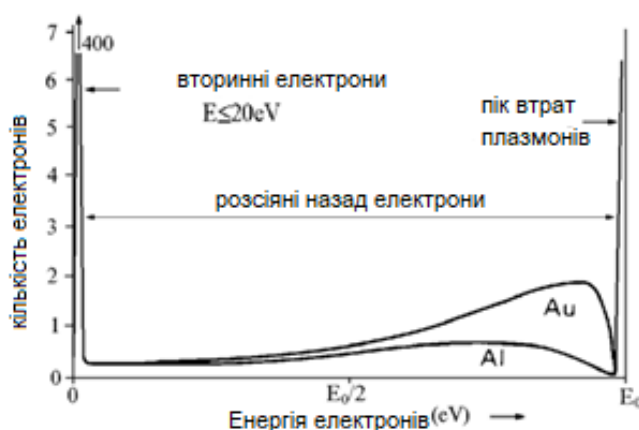


Рис 2.8. Енергетичний спектр електронів, які покидають поверхню мішені під дією електронів зонда.

Освітлення вторинних електронів відбувається в усій області взаємодії електронів зонда з мішенню, проте залишити поверхню мішені можуть лише електрони, що виникли в тонкому приповерхневому шарі. Слід підкреслити, що вторинні електрони утворюються не тільки безпосередньо під дією первинних електронів зонда, а й за рахунок взаємодії відбитих з глибших шарів електронів з електронами зони провідності в області їх виходу з зразка, тобто поблизу поверхні виходу. Звідси випливає, що поперечні розміри області виходу вторинних і відбитих електронів збігаються. У той же час глибина виходу для вторинних електронів на два порядки менше відповідної величини для

відбитих електронів і складає приблизно $0.003R$.

Вторинні електрони на відміну від розсіяних назад електронів не виявляють помітної залежності від атомного номера. Зі збільшенням кута нахилу зразка коефіцієнт емісії вторинних електронів η_{se} зростає, що пов'язано зі збільшенням довжини ефективного шляху первинних електронів поблизу поверхні мішені, в той же час напрямки виходу вторинних електронів не міняються при нахилі мішені, тобто напрямку виходу вторинних електронів ізотропні щодо падаючого пучка.

Слід підкреслити, що завершеної теорії електронної емісії електронів в даний час не існує. Для опису цих складних процесів використовують різні наближення квантової механіки і, досить часто, напівемпіричні співвідношення.

Рентгенівське випромінювання. Поряд з відбитими і вторинними електронами в матеріалі мішені за рахунок непружних втрат енергії електронів зонда виникає рентгенівське випромінювання. Відомо, що є два принципово різних шляхи виникнення рентгенівських квантів [16,17]. В результаті гальмування електронів зонда в кулоновських полях атомів утворюється так зване гальмівне або безперервне рентгенівське випромінювання. Спектр гальмівного рентгенівського випромінювання залежить як від атомного номера мішені, так і від енергії електронів зонда. Інтенсивність гальмівного спектру зростає зі збільшенням енергії бомбардують мішень електронів і зі збільшенням атомного номера елемента мішені.

Поряд з актами гальмування електрони зонда можуть вибивати пов'язані електрони з глибоких внутрішніх К-, L-, M-

оболонки, переводячи атом в збуджений стан. Збуджені атоми повертаються в основне стаціонарний стан в результаті електронних переходів з більш високою оболонки з випромінюванням надлишкової енергії у вигляді кванта рентгенівського випромінювання

Всі можливі випромінювальні переходи атома з початкового К-стану утворюють найбільш жорстку короткохвильову К-серію. Аналогічно утворюються інші L-, M-, N- серії. В результаті на безперервний спектр накладаються гострі піки характеристичного випромінювання, що відповідають цим переходам. На рис.2.9 показаний загальний вигляд інтенсивності рентгенівського випромінювання від довжини хвилі.

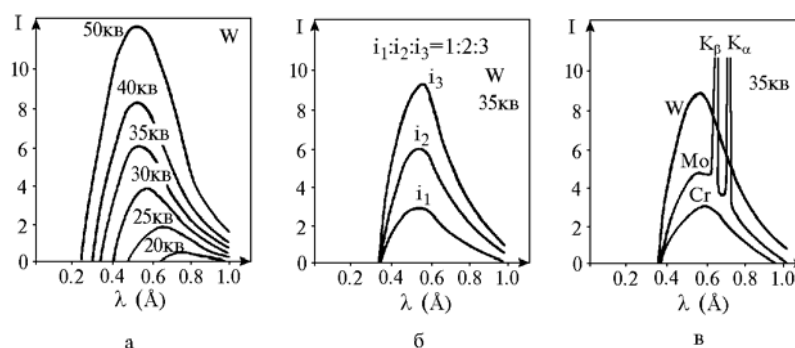


Рис.2.9. Загальний вигляд рентгенівського спектра. а) - характер змін рентгенівського спектра збуджується на мішені з W з ростом прискорюючої напруги; б) вид спектра для кількох значень струму зонда; в) -рентгеновські спектри для трьох різних матеріалів мішені.

$$\lambda = \frac{B}{(Z - C)^2}$$

Аналізуючи рентгенівські спектри різних елементів, Н.Мoseley в 1914 році встановив, що довжина хвилі рентгенівського випромінювання \propto атомний номер Z елемента,

який випустив квант, пов'язані співвідношенням

який отримав назву закону Мозлі. Величини B і C тут - чисельні константи. Ця залежність показує, що між параметрами характеристичного рентгенівського спектра і складом мішені існує взаємно однозначна відповідність, що і є основою рентгеноспектрального аналізу атомного складу матеріалів.

Дослідження інтенсивності ліній характеристичного випромінювання $I_c \sim i_z (E_z - E_i)^{1.4}$ ни пов'язані з енергією електронів зонда наступним співвідношенням

де E_i - критична енергія збудження відповідного рівня, E_z - енергія електронів пучка. Так як інтенсивність характеристичних ліній завжди накладена на інтенсивність безперервного спектра, що представляє собою по суті постійний рівень фону, завжди утрудняє точне визначення положення ліній характеристичного спектра, відношення інтенсивності характеристичної лінії до інтенсивності безперервного спектра описує ставлення пік / фон, тобто характеризує точність вимірювання.

Аналіз процесів генерації рентгенівського випромінювання показує, що область генерації має значно більші розміри, ніж для відображених або розсіяних електронів. З формули Канайо-Окаяма слід, що довжина пробігу електронів в речовині мішені визначається енергією електронів зонда. Абсолютно ясно, що глибина генерації рентгенівського випромінювання менше довжини пробігу електронів, так як для збудження характеристичного випромінювання необхідно, щоб енергія електронів була більше енергії збудження відповідної лінії, тобто $E_0 > E_i$.

При взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною

можуть спостерігатися фотоефект, пов'язане з ним поглинання рентгенівського кванта і когерентне і некогерентного розсіювання. Фотоефект полягає в тому, що атом, що поглинув рентгенівський квант, емітує електрон (фотоелектрон) з одного зі своїх внутрішніх оболонок, після чого він може повернутися в початковий стан або шляхом випускання нового рентгенівського кванта (рентгенівська флуоресценція), або викинути другий електрон (оже електрон) при безізлучательном переході.

Пройходження рентгенівського випромінювання через шар речовини товщиною z супроводжується послабленням його інтенсивності (за рахунок фотоефекту) за експоненціальним законом

На практиці частіше використовують масові коефіцієнти поглинання. Масові коефіцієнти різних речовин плавно зменшуються з ростом енергії рентгенівського випромінювання. Однак коли енергія кванта стає достатньою для виривання пов'язаного електрона з будь-якого рівня для даного елемента, коефіцієнт поглинання різко зростає. Цей стрибок коефіцієнта поглинання отримав назву краю поглинання. Далі зі зростанням енергії кванта коефіцієнт поглинання продовжує плавно спадати з ростом енергії кванта, поки не зрівняється з наступним електронним рівнем.

Оже-електрони. Цей ефект був відкритий П.Оже в 1925 році. Суть явища полягає в тому, що атом, збуджений в результаті іонізації внутрішніх електронних оболонок електронами зонда, може повернутися в основний стан шляхом безізлучательного переходу. Енергія збудження $E_K - E_{L1}$ передається іншому

електрону, наприклад, займає сусідній рівень L2. Цей електрон виходить за межі мішені і реєструється, як Оже електрон.

Оскільки в оже-електронної емісії часто беруть участь валентні електрони і істотну роль грає енергія зв'язку внутрішніх рівнів, енергія оже-електронів буде визначатися хімічним оточенням. Під впливом енергії зв'язку електронні рівні можуть зрушуватися на кілька еВ. Тому оже спектри будуть містити інформацію про хімічний оточенні атома, випустивши оже-електрон. Інша особливість використання оже-електронів пов'язана з дуже малими енергіями оже-електронів. Так для електронів з енергією від 50 еВ < 2 кев середня довжина пробігу становить близько 0.1-2.0 нм. Таким чином, область взаємодії для оже електронів буде обмежена товщиною під поверхнею мішені в кілька міжатомних відстаней і площею на поверхні, що задається діаметром зонда.

Таким чином, основна область застосування оже-електронів - це дослідження стану атомів на поверхні мішені.

2.3.3. ОБЛАСТЬ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОНІВ ЗОНДА З РЕЧОВИНОЮ

Електрони зонда, проникаючи в матеріал мішені, багаторазово взаємодіють з електронами атомів, решітки, з електричними полями ядер, втрачаючи енергію аж до захоплення електрона зонда будь-яким центром решітки. Так як траєкторії руху кожного електрона мають досить складну форму, в зразку мішені утворюється область, в якій електрони зонда витрачають всю свою енергію. Ця область отримала в літературі назву області взаємодії [18-20].

Відповідно до формули Резерфорда перетин пружного розсіювання обернено пропорційно енергії частинок. Тому при перших актах взаємодії,

коли енергія частинок ще велика, ймовірність розсіювання на великі кути мала. На цьому етапі найбільш імовірним процесом взаємодії є непружне розсіювання на малі кути. З просуванням електронів в глиб мішені вони втрачають частину енергії, зростає ймовірність пружних взаємодій, тобто зростає кут розсіювання, а це в свою чергу веде до збільшення поперечних розмірів області взаємодії з ростом глибини. Таким чином із загальних міркувань випливає, що область взаємодії повинна мати форму груші, що висить від поверхні всередину мішені. На рис.2.10 показаний вид області взаємодії і її орієнтація під поверхнею мішені.



Рис..2.10. Загальний вигляд області взаємодії електронів зонда з мішенню

Область взаємодії можна спостерігати експериментально, використовуючи деякі органічні матеріали, наприклад, поліметилметакрилат, в яких під дією електронів відбуваються хімічні реакції, що призводять до часткового або повного розпаду молекул [18]. Можна підібрати спеціальні розчинники, які будуть видаляти розклалися молекули, в результаті в матеріалі утворюється порожнина, відповідна області взаємодії електронів з речовиною мішені. На рис.2.11 показана область взаємодії, отримана таким способом. Як і випливає з міркувань, наведених вище, глибина області взаємодії приблизно відповідає повній довжині пробігу електрона в речовині мішені і становить відповідно до формули Канайо-Окаяма кілька мікрон. З

рис.5.9 видно, що глибина області взаємодії дещо більше її ширини.

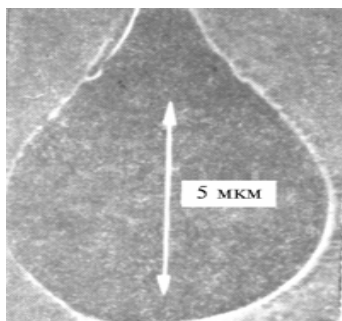


Рис.2.11. Область взаємодії електронного пучка з мішенню з поліметилметакрилату, отримана після розчинення продуктів розпаду[18].

Траєкторія руху електронів, а, отже, і параметр області взаємодії можуть бути отримані з розрахунків за методом Монте-Карло

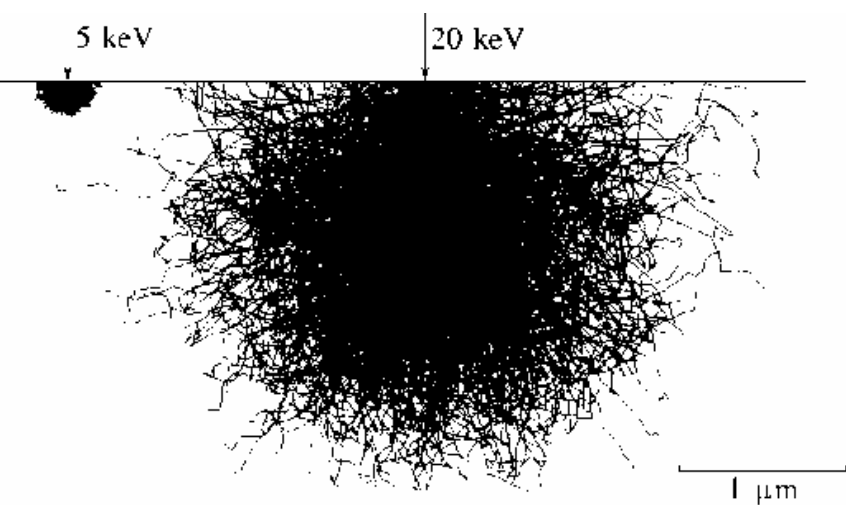


Рис.2.12. Характер траєкторій електронів, отриманих в результаті захунку по методу Монте-Карло, і мування області взаємодії[20].

2.4. ФОРМУВАННЯ КОНТРАСТУ У РЕМ

2.4.1. ОСНОВНИЙ МЕХАНІЗМ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ У РЕМ

Механізми формування зображення в РЕМ відрізняються від формування зображення в оптичному або просвічує електронних мікроскопах. У оптичному і просвічує ЕМ зображення формується за допомогою лінз і носить, таким чином, дифракційну характер. Зображення в РЕМ - це результат відображення змін від точки до точки в характері взаємодії електронів зонда з поверхнею мішені [5-11,14,15,22].

Контраст між двома точками на зображенні може відрізнятиметься внаслідок відмінності у взаємодії електронів зонда з матеріалом мішені.

Контраст, який визначається атомним складом мішені Коефіцієнт відбиття електронів залежить від атомного номера і зростає з ростом останнього. Тому на екрані монітора РЕМ області, що містять елементи з високим атомним номером, матимуть більш світлий контраст у порівнянні з більш легкими елементами. Таким чином можна проводити якісний аналіз атомного складу поверхні, використовуючи поліровані і навіть не травлені зразки. Слід підкреслити, що коефіцієнт істинно вторинної емісії слабо залежить від атомного номера і, отже, у вторинних електронах такий контраст спостерігатися не буде.

Магнітний контраст. Так як на траєкторії руху електронів впливають магнітні поля, наявні в зразку або поблизу його поверхні, растрова мікроскопія дозволяє досліджувати розподіл магнітних полів на поверхні магнітних матеріалів. Всі магнітні матеріали можна умовно розділити на дві групи: одновісні кристали, у яких магнітні поля доменів замикаються зовнішніми полями поблизу зразка; і кристали більш

високою магнітною симетрії з дуже малими зовнішніми полями завдяки присутності в поверхневому шарі спеціальних замикаючих доменів. З електродинаміки добре відомо, що на електрон, що рухається в магнітному полі, діє сила Лоренца.

Розрізняють магнітний контраст 1-ого та 2-ої роду. Контраст, який виникає через перерозподіл вторинних низькоенергетичних електронів в зовнішньому магнітному полі над поверхнею зразка, отримав в літературі назву магнітного контраста першого роду. Магнітний контраст другого роду утворюється в результаті взаємодії первинних електронів з магнітним полем всередині зразка, коли під дією сили Лоренца відбувається відхилення електронів, причому в сусідніх 180-градусних доменах - в протилежну сторону. Відповідним нахилом зразка можна так змінити шлях електронів, що виникне асиметрія контрасту в сусідніх доменах.

Енерго-дисперсійний метод реєстрації спектра. З 70-их років в практику рентгеноспектрального мікрозондового аналізу почали входити енергодисперсійного напівпровідникові детектори на основі Si, легovanого Li. На базі таких детекторів в даний час створені досить досконалі енергодисперсійного системи, що дозволяють аналізувати спектри практично всіх елементів. На рис.2.13 наведена спрощена блок-схема енергодисперсійного спектрометра.

Рентгенівські кванти, що випускаються мішенню під впливом електронного зонда, через тонке берилієве вікно потрапляють на вхід напівпровідникового детектора. Практично кожен квант викликає поява електричного імпульсу, амплітуда якого пропорційна енергії кванта. Електричні імпульси посилюються спеціальними малoshумящими підсилювачами, упорядковано багатоканальним аналізатором або ЕОМ по амплітудах, видаються в графічному вигляді на екран монітора і одночасно реєструються в пам'яті ЕОМ або багатоканального

амплітудного аналізатора для подальшої обробки.

При взаємодії з матеріалом детектора електрон буде витрачати свою енергію в основному на формування корисного сигналу, однак частина енергії може витрачатися на різного роду неупругі взаємодії, в результаті чого буде спостерігатися розкид імпульсів по амплітуді. Тому полушіріна лінії навіть для моноенергетичних електронів буде сильно залежати від таких шумових втрат енергії. Для зниження рівня шумів напівпровідникових детекторів використовують охолодження детектора і вхідного підсилювача до температури рідкого азоту. Таким способом вдається довести дозвіл детекторів до величини 100-150 еВ.

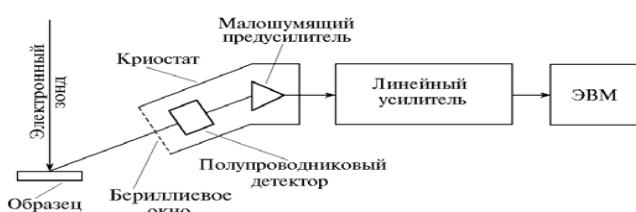


Рис.2.13.Блок-схема енергодисперсійного рентгенівського спектрометра.

Енергодисперсійного спектрометри мають одну дуже важливу перевагу в порівнянні з кристал- дифракційними спектрометрами - вони не вимагають переміщень детектора в камері спектрометра, тому що весь спектр реєструється одночасно для всіх довжин хвиль.

І хоча дозвіл енергодисперсійного спектрометра істотно поступається кристал-дифракційному, простота кінематичної конструкції і експресному методу реєстрації ставлять енергодисперсійний метод на перше місце при вирішенні більшості завдань, особливо на попередній стадії дослідження, рентгенівського мікроаналізу. Тому в конструкції сучасних рентгенівських мікроаналізаторів зазвичай присутні обидва типи спектрометрів.

У таблиці 2.2. наведені основні характеристики цих двох типів спектрометрів.

Основні параметри спектрометрів	Кристал-дифракційні спектрометри	енерго-дисперсійні спектрометри
Енергетичний дозвіл	<10ев	□ 100-150ев
ефективність детектора	<30%	95-100%
Вимоги до фокусування	жорсткі	відсутні
Швидкість проведення аналізу	Десятки хвилин	хвилини

Таблиця. 2.2 Порівняльні характеристики кристал-дифракційних енергодисперсійних спектрометрів

Підготовка об'єктів для досліджень і особливі вимоги до них

У загальному випадку підготовка для аналізу металевих зразків не викликає особливих труднощів. Вони готуються як звичайні металлографіческие шліфи з використанням шліфування і наступного полірування. Однак поверхня зразків повинна бути абсолютно плоскою і не мати рисок і рельєфу.

Абразивні частинки можуть впроваджуватися в поверхню зразка. Наприклад, не можна використовувати традиційні абразиви - оксиди хрому, алюмінію або карбід кремнію, якщо до складу матеріалу входять Cr, Al або Si.

Необхідно мати на увазі, що при заливці шлифов в сплав Вуда або інші м'які композиції можливо їх "намазування" на поверхню зразка.

Слід уникати електрополірування і хімічного травлення, так як вони

можуть призвести до утворення рельєфу і викликати небезпеку збагачення або збіднення компонентів поверхні внаслідок селективного травлення. Для того, щоб відшукати необхідне місце зразка в Рентгеноспектральний мікроаналізаторах, можна після полірування слабо протравить зразок і відзначити необхідні місця відбитками мікротвердості. Потім зразок потрібно знову переполірувати до такої міри, коли травлення зникне, а маркування залишиться.

У тому випадку, коли при заливці шліфів використовувалася пластмаса, вона повинна бути видалена з поверхні зразка, так як під впливом електронного променя вона випаровується і забруднює апаратуру.

При аналізі неелектропровідних об'єктів на поверхню шліфа напильюють електропровідні матеріали: вуглець, алюміній, золото. Іноді для цих цілей використовують срібло. Найчастіше застосовують вуглець, так як він не утворює оксидних плівок і дешевий.

У будь-якому випадку досліджуваний зразок повинен бути ідеально чистим. Ця вимога стосується як растрової електронної мікроскопії, так і до рентгеноспектрального мікроаналізу. Перш за все, потрібно усунути контакт шліфованого ділянки зразка з пальцями. Якщо виявиться необхідність в додатковому очищенні поверхні зразка, то для цього використовують спеціальні промивні засоби, в тому числі очищення із застосуванням ультразвуку.

2.4.2. УСТАНОВКА ЗРАЗКІВ В КОЛОНІ МІКРОСКОПА

Для встановлення зразка в колоні мікроскопа використовуються різні типи власників. Приготований зразок фіксується в тримачі мікроскопа. Тримач вводиться в колону мікроскопа згідно що додається до цього мікроскопу технічного керівництва по експлуатації.

2.4.2 ВИБІР ДІЛЯНКИ ДЛЯ АНАЛІЗУ

Після установки зразка в колоні мікроскопа потрібно зробити ряд дій для виявлення електронного пучка і отримання зображення структури: включити емісію і зменшити збільшення. Ці операції детально описані в керівництві користувача мікроскопа.

Отримавши зображення структури, слід за допомогою ручок переміщення зразка вибрати цікавить місце для аналізу. Виявивши потрібне місце, слід вибрати режим роботи мікроскопа і зробити юстировку мікроскопа в цьому режимі (корегує фокус, астигматизму і т.п.) згідно інструкції користувача. Опрацювання результатів

Після завершення вимірювань проводиться обробка отриманих результатів.

З метою більш точного визначення вимірюваних величин, проводиться кілька її вимірів. Для вимірювань, проведених в межах однієї структурної складової, розраховують середнє значення вимірюваної величини \bar{x} , а також стандартне відхилення

РОЗДІЛ 3: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Композиційні матеріали на основі частинок дрібнодисперсних металів представляють великий інтерес для експериментів і теоретичних досліджень. Фізичні властивості таких матеріалів радикально відрізняються від властивостей суцільного середовища, виготовлених з тих же матеріалів. Результати розрахунків порівнювалися з експериментальними даними для перевірки отриманих моделей, щоб вибрати найбільш підходящу. Для дослідження було обрано три зразки: резина, резина+Ni, резина+graphit, припускаючи, що характеристики повинні були нас задовільнити.

ПІДГОТОВКА ЗРАЗКІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННОГО МІКРОСКОПУ.

Вирізали з цілісного зразка зразки для досліджень заданого розміру, щоб вони помістилися в камеру. В результаті чого провели дослідження структури торцевої поверхні зразка, щоб досліджувати чистоту зразка на відсутність небажаних домішок та рівномірність розподілу потрібної домішки.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

В ранніх наукових роботах кафедри були отримані данні: діелектричні характеристики трьох зразків. Силіконова гума чиста нормально: діелектрична проникність від 1.95 до 2.05, тангенс кута діелектричних втрат від $8e^{-4}$ до $1,2e^{-3}$. Це в межах похибки приладів, а ось наповнені зразки розрізняються значно по діелектричній проникності:

Зразки з нікелем мають діелектричну проникність від 2.9 до 5.6, а тангенс кута діелектричних втрат від $8.3e^{-4}$ до $1.7e^{-3}$.

Зразки з вуглецем мають діелектричну проникність від 2.7 до 3.5, а тангенс кута діелектричних втрат від $8.1e^{-4}$ до $7.2e^{-3}$.

Важливим параметром є рівномірність розподілу домішок. Було виявлено, що результати нерівномірні.

Щоб перевірити структуру і хімічний склад на ділянках кожного з зразків. Були проведені дослідження в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України з використанням скануючого електронного мікроскопа ZEISS EVO 50XVP виробництва фірми ZEISS, укомплектованого енергодисперсійним аналізатором рентгенівських спектрів INCA450 з детектором INCAPentaFETx3 та системою HKL CHANNEL-5 для дифракції відбитих електронів виробництва фірми OXFORD.

На рис. зображено структуру композитів зі збільшенням в 150 разів, де ЕНТ-прискорююча напруга, WD- відстань від поверхні виходу гармати до зразка, Signal ASE1- детектор вторинних електронів.

Мною були підібрані режими досліджень для зразка Резина+Графіт ЕНТ-20 кВ, робоча відстань WD-9.5 мм.

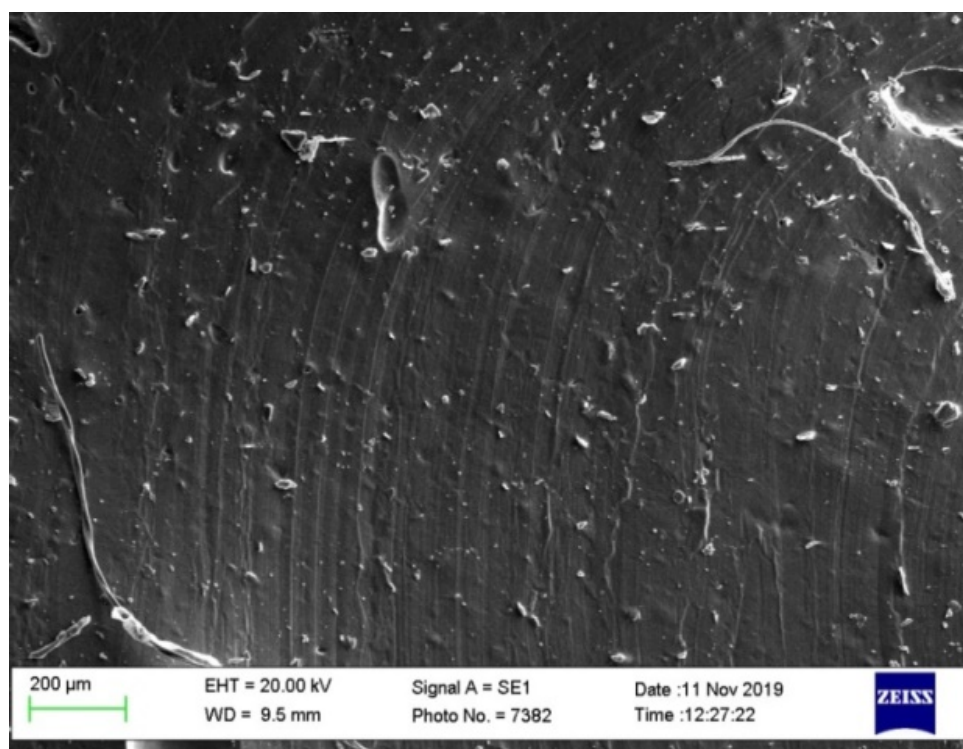


Рис.3.1. Структура композиту Резина+Графіт зі збільшенням в 150 разів.

Аналогічно для зразка Резина+Ni використовуючи енергодиспсійний спектрометр були підбрані режими досліджень ЕНТ-20 кВ, робоча відстань від поверхні виходу гармати до зразка WD-9.5 мм. На рис 3.2 зображена отримана структура композиту Резина+Ni зі збільшенням в 150 разів.

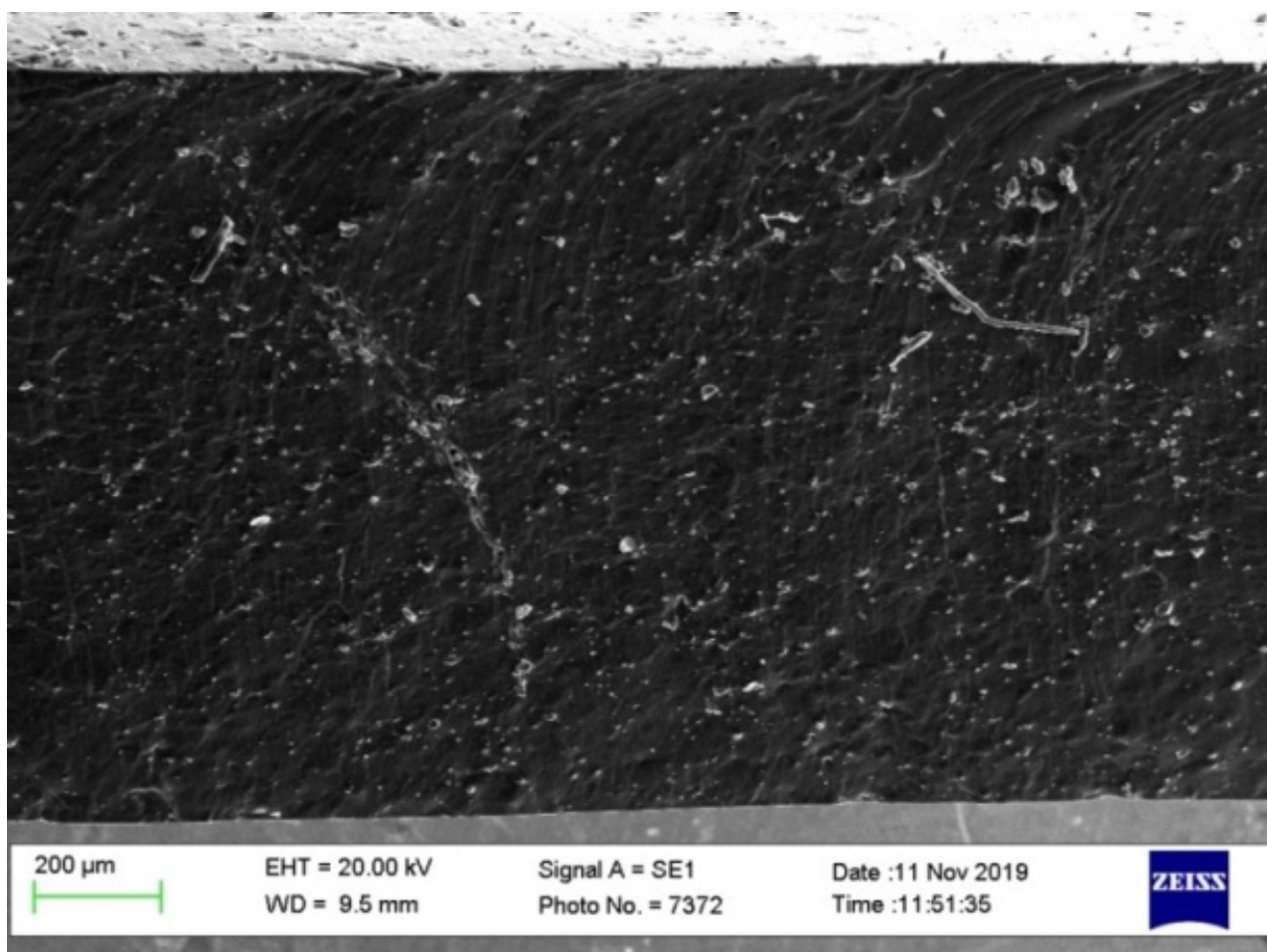


Рис.3.2. Структура композиту Резина+Ni зі збільшенням в 150 разів.

Аналогічно для зразка Резина чиста використовуючи енергодиспсійний спектрометр були підібрані режими досліджень ЕНТ-20 кВ, робоча відстань від поверхні виходу гармати до зразка WD-9.0 мм. На рис 3.3 зображена отримана структура композиту Резина+Ni зі збільшенням в 150 разів

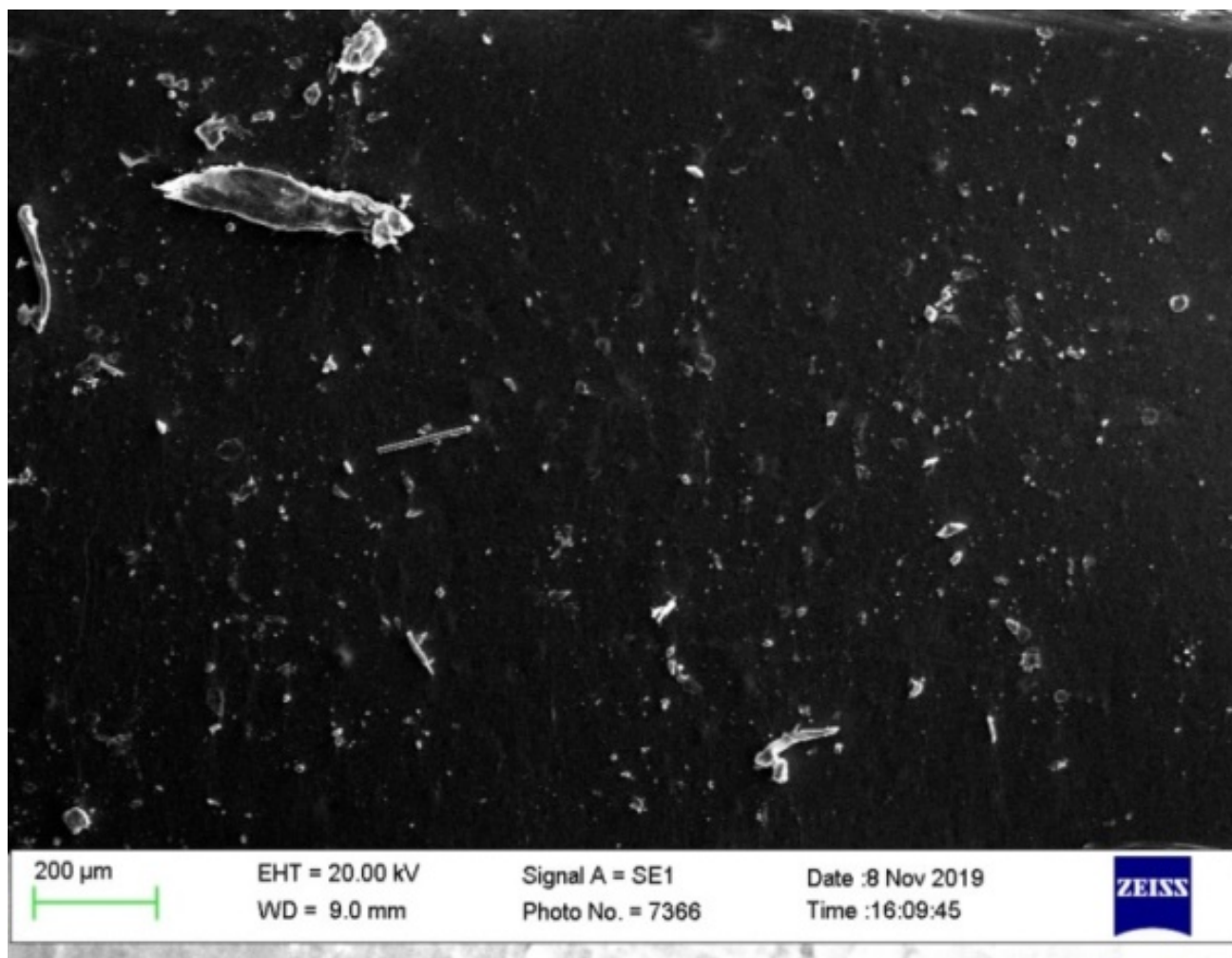


Рис.3.3 Структура композиту Резина чиста зі збільшенням в 150 разів.

При подальшому дослідженні деякі ділянки нас зацікавили, тому було прийняте рішення збільшити в 500 разів

Для зразка Резина+графіт використовуючи енергодиспсійний спектрометр були підібрані режими досліджень EHT-20 кВ, робоча відстань від поверхні виходу гармати до зразка WD-9.5 мм. На рис 3.4 зображена отримана структура композиту Резина+Ni зі збільшенням в 150 разів

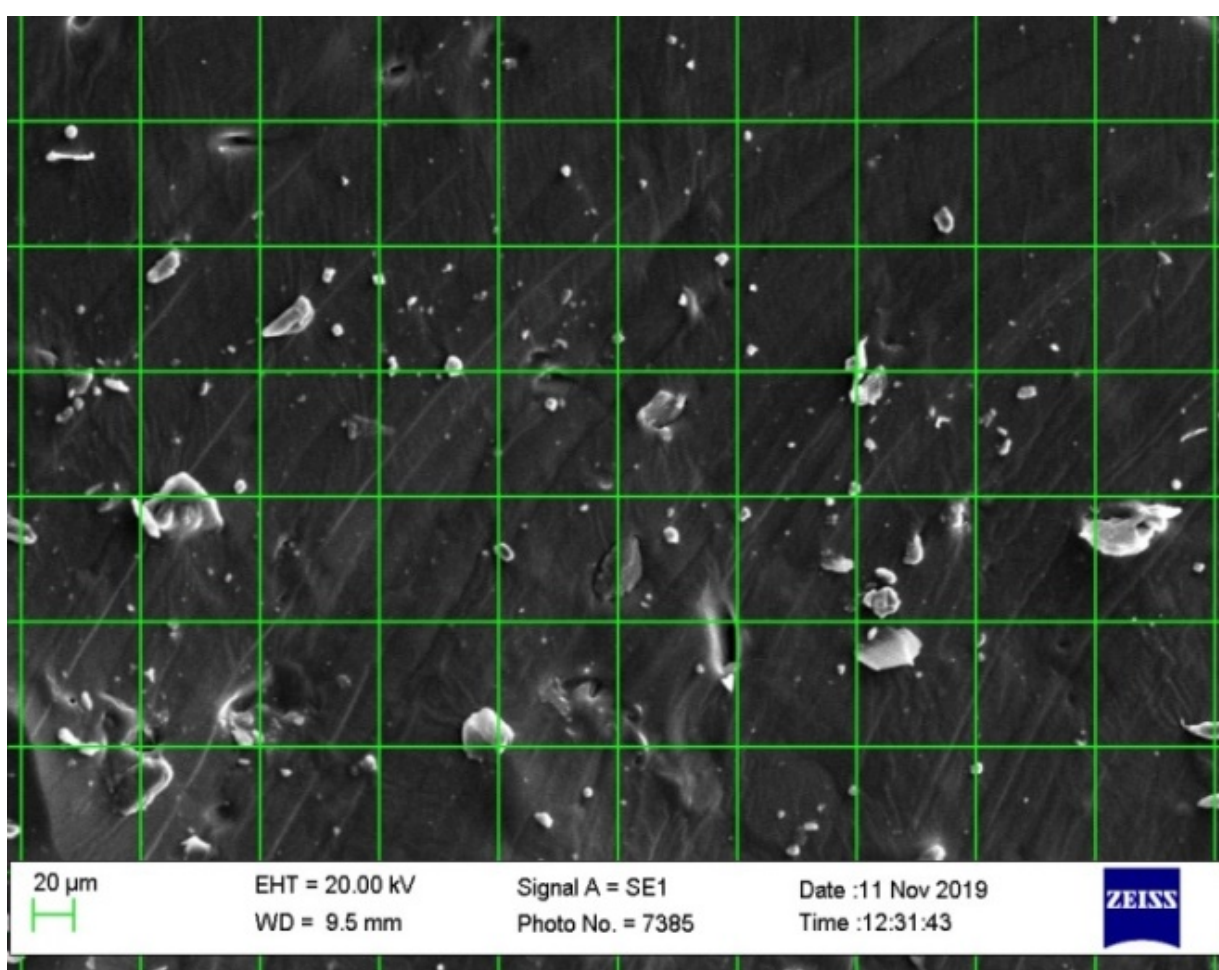


Рис.3.4 Структура композиту Резина+Графіт зі збільшенням в 500 разів

Для зразка Резина чиста використовуючи енергодиспсійний спектрометр були підібрані режими досліджень EHT-20 кВ, робоча відстань від поверхні виходу гармати до зразка WD-9.5 мм. На рис 3.5 зображена отримана структура композиту Резина+Ni зі збільшенням в 500 разів

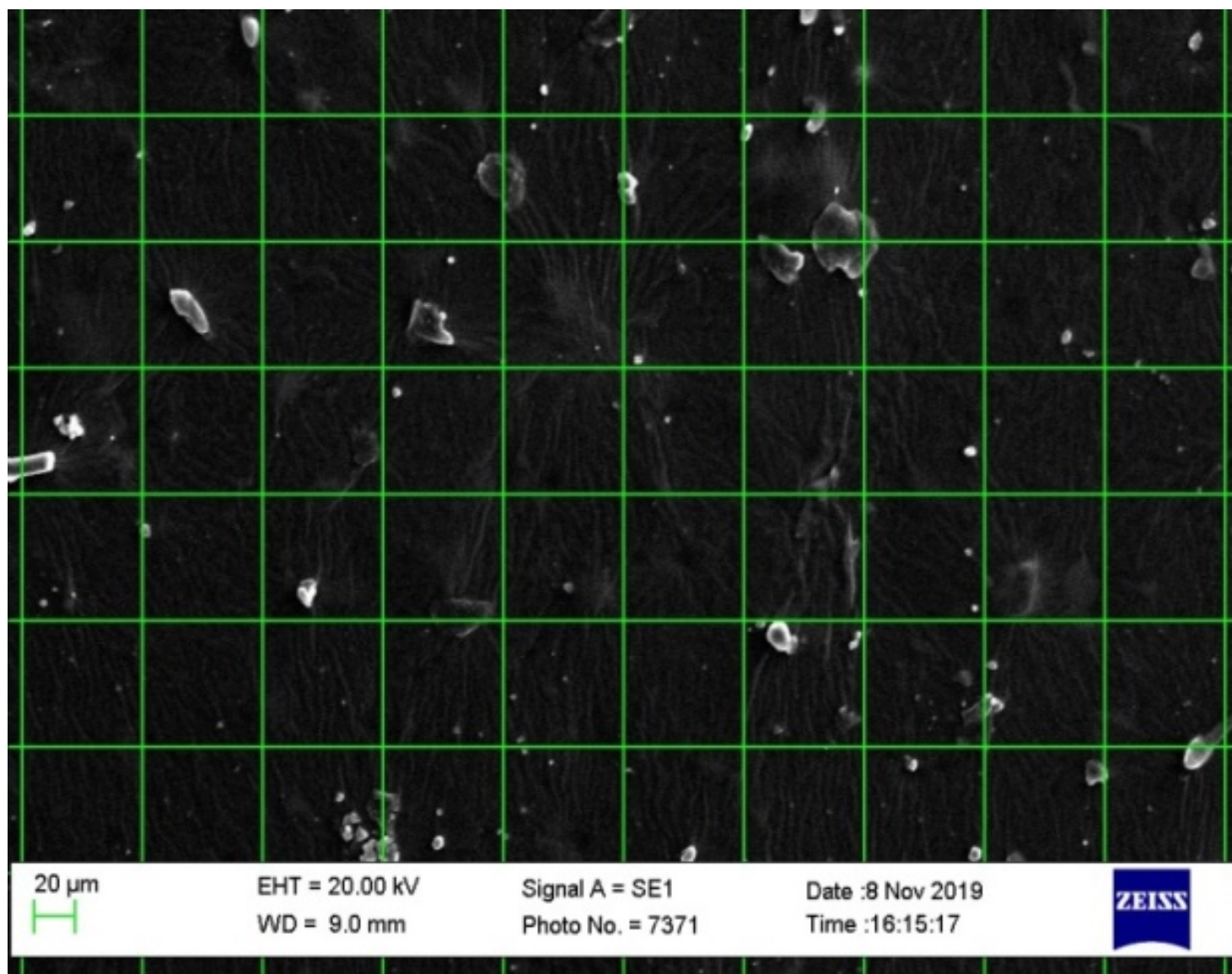


Рис.3.5.Структура композиту Резина чиста зі збільшенням в 500 разів

Для зразка Резина+Ni використовуючи енергодиспесійний спектрометр були підібрані режими досліджень EHT-20 кВ, робоча відстань від поверхні виходу гармати до зразка WD-9.5 мм. На рис 3.4 зображена отримана структура композиту Резина+Ni зі збільшенням в 150 разів

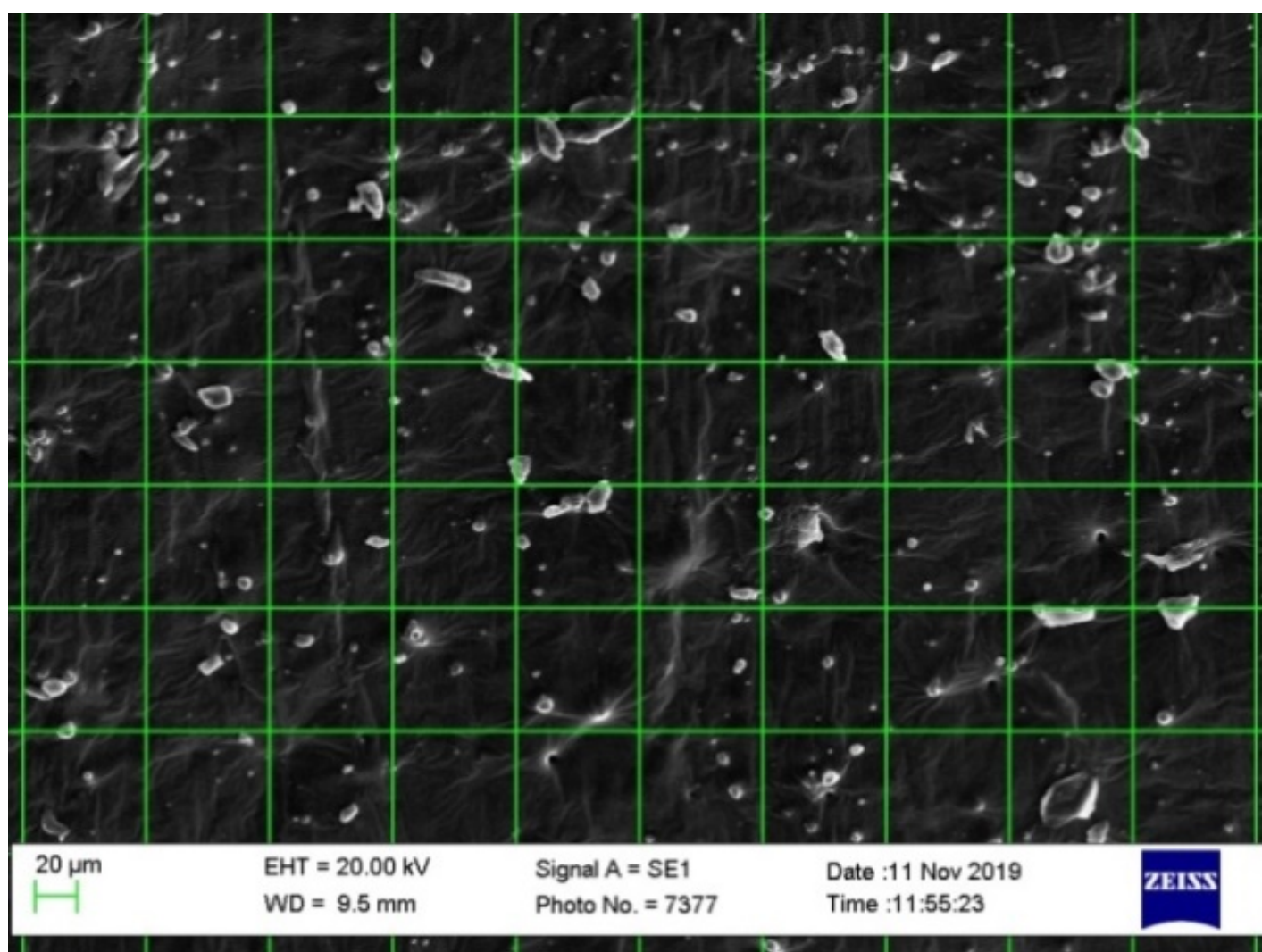


Рис.3.6. Структура композиту Резина+Ni зі збільшенням в 500 разів

Після цього на кожному з зразків використовуючи енергодисперсійний спектрометр на зразку композиту резина+Ni ,будемо досліджувати наявність елементів в обраних областях.

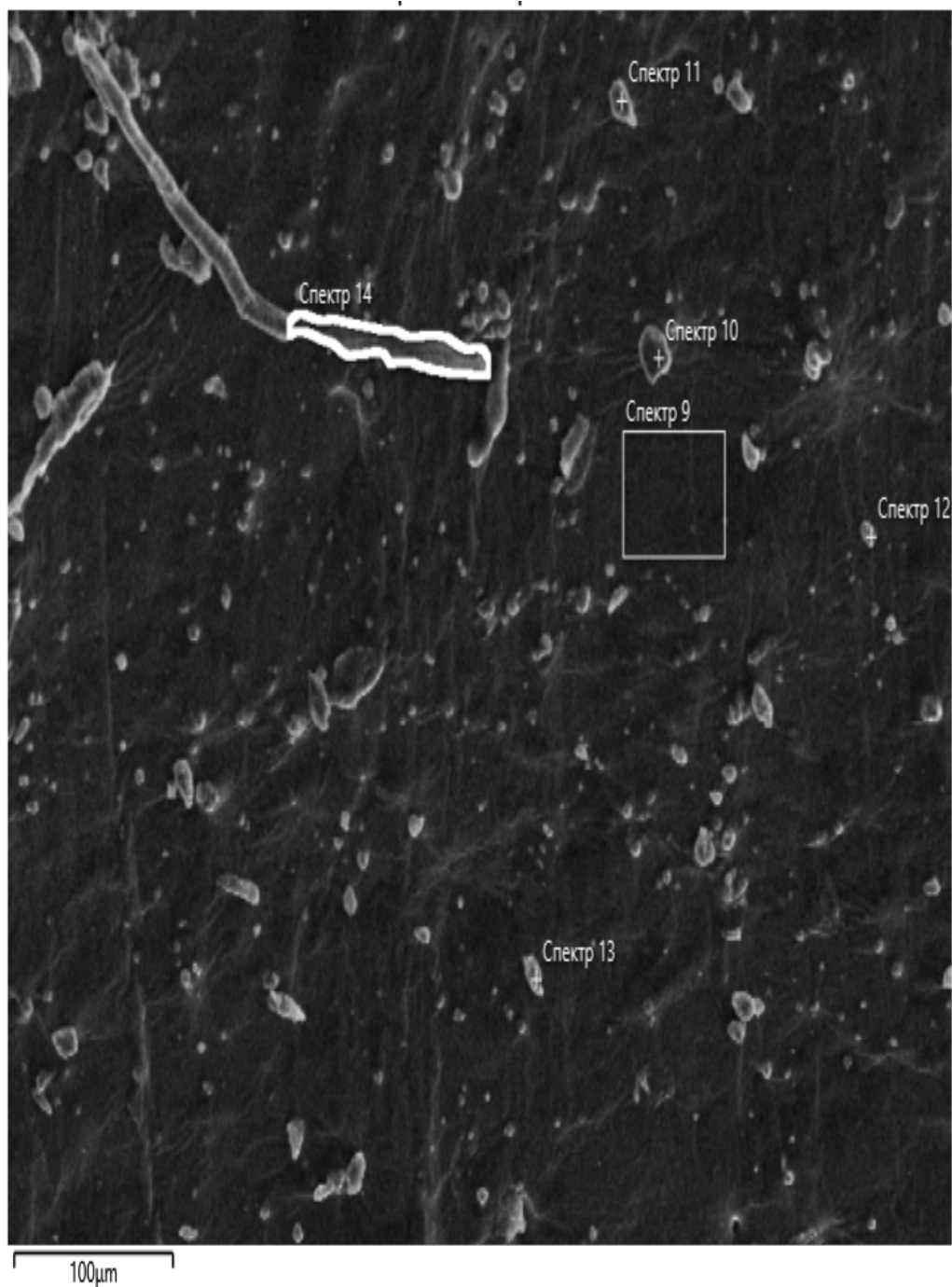


Рис.3.7.Структура композиту резина+Ni

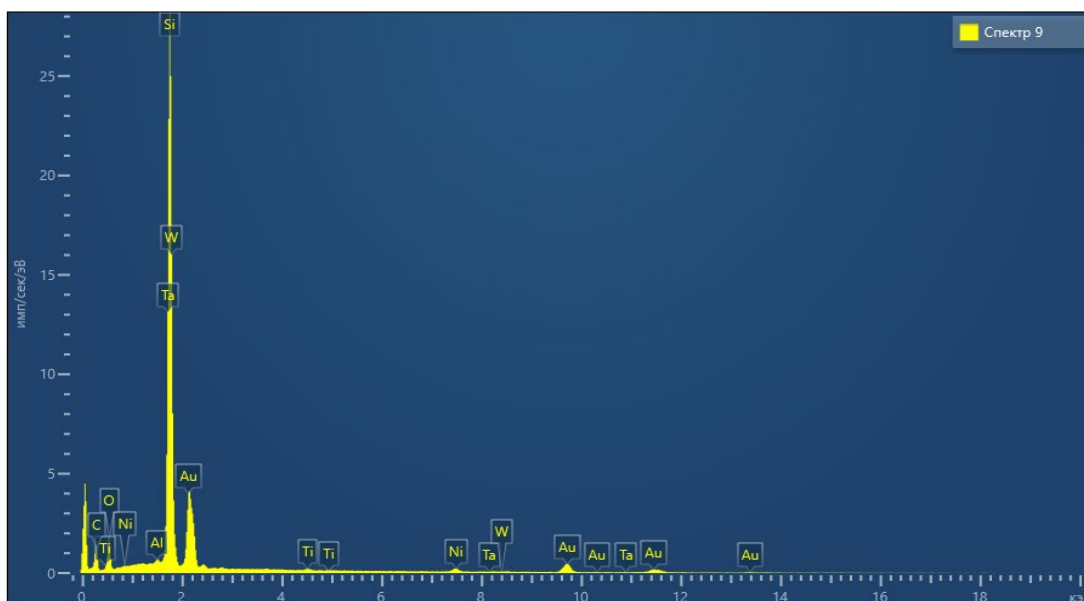


Рис.3.8. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в обраній області 9.

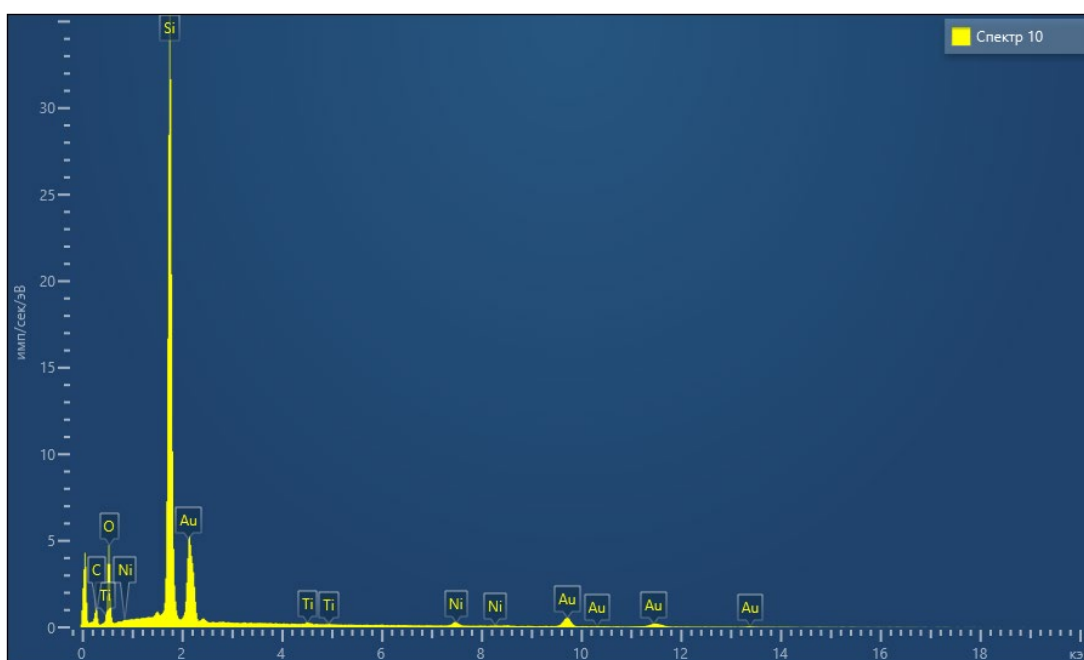


Рис.3.9. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в обраній області 10.

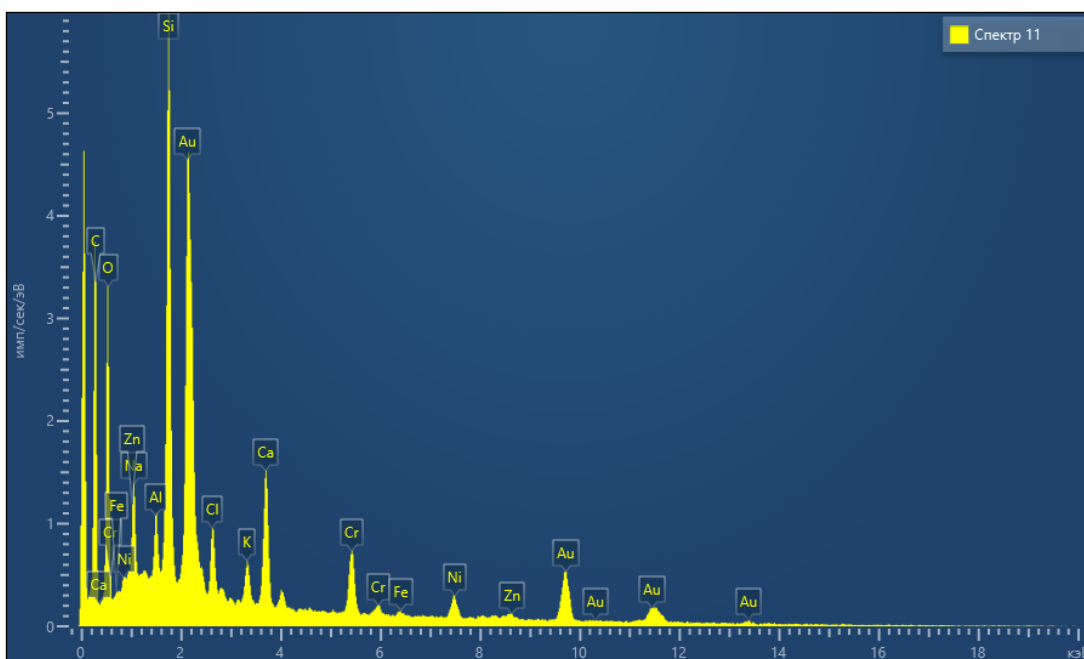


Рис. 3.10. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 11.

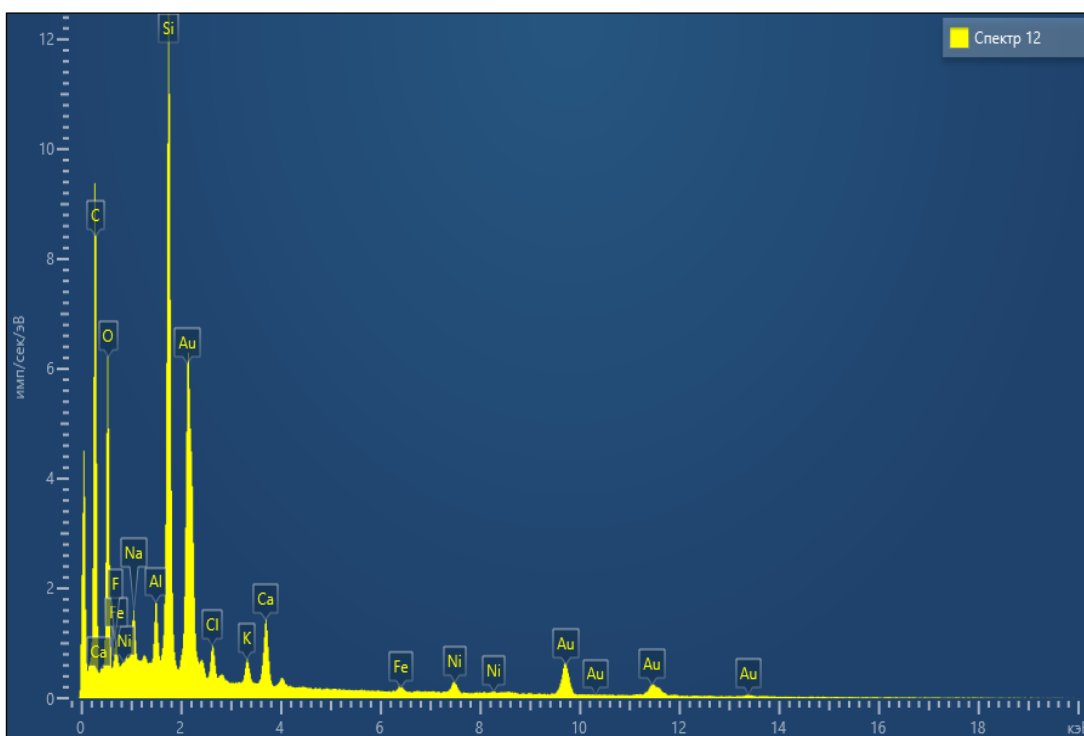


Рис.3.11. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 12

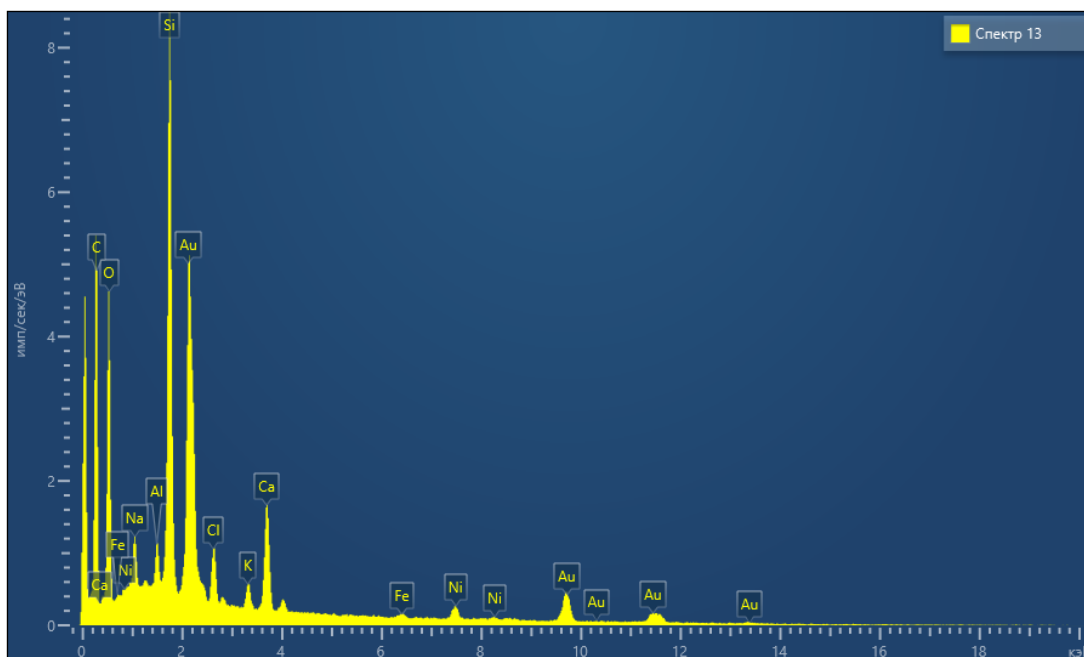


Рис.3.12. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 13.

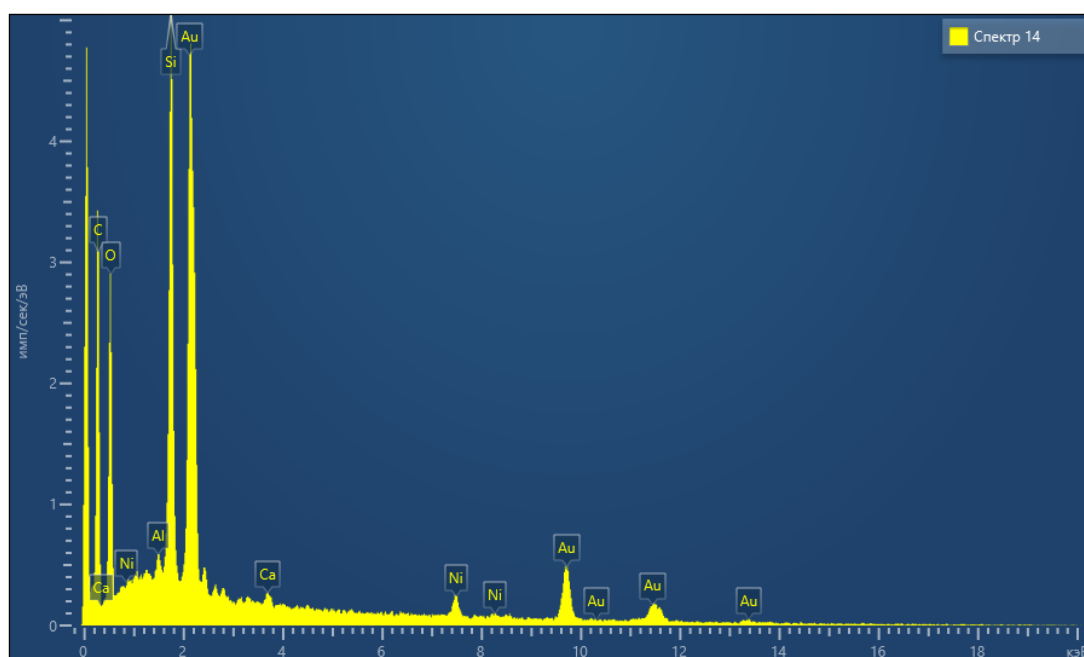


Рис.3.13. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 14.

Тип результату	Атом. %
-------------------	---------

Мітка спектру	Спектр 9	Спектр 10	Спектр 11	Спектр 12	Спектр13	Спектр14
C	55.13	36.73	57.34	61.61	57.89	62.48
O	18.48	34.02	29.31	27.63	31.90	30.92
F				2.12		
Na			1.81	0.84	1.03	
Al	0.20		0.75	0.61	0.50	0.27
Si	25.45	28.41	5.42	5.37	5.62	5.36
Cl			0.76	0.34	0.66	
K			0.47	0.25	0.32	
Ca			1.75	0.75	1.47	0.18
Ti	0.15	0.14				
Cr			1.29			
Fe			0.11	0.12	0.11	
Ni	0.60	0.70	0.79	0.35	0.50	0.80
Zn			0.21			
Ta	0.00					
W	0.00					
Всього	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Таблиця 3.1. Відсотковий перерахунок на атоми Резина+Ni

Після цього на кожному з зразків використовуючи енергодисперсійний спектрометр на зразку композиту резина+графіт ,будемо досліджувати наявність елементів в обраних областях.

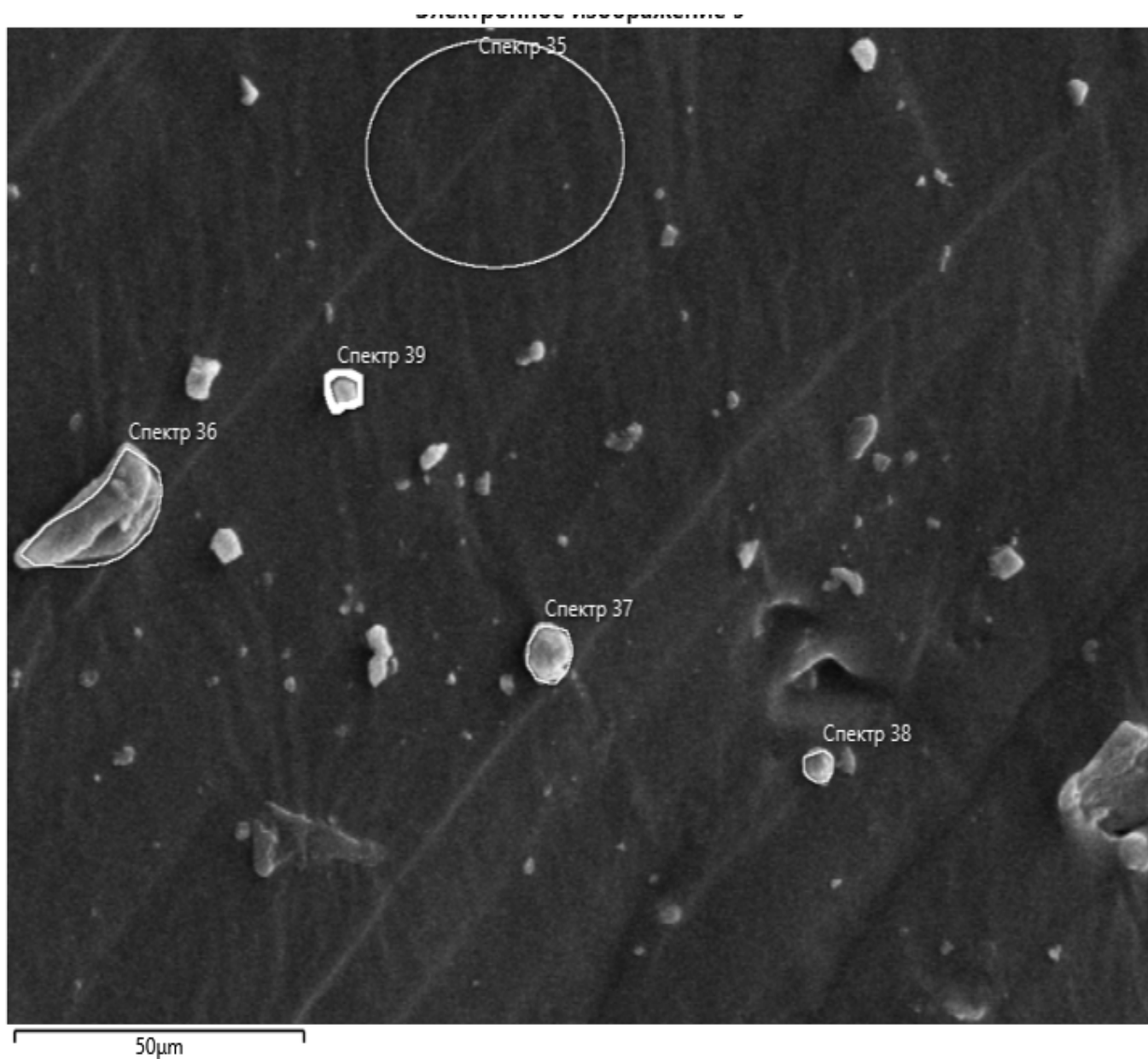


Рисунок.3.14 Структура композиту резина+графіт

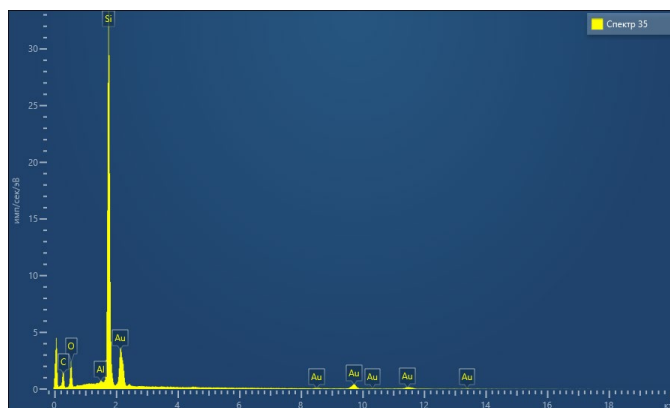


Рис. 3.15. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 35.

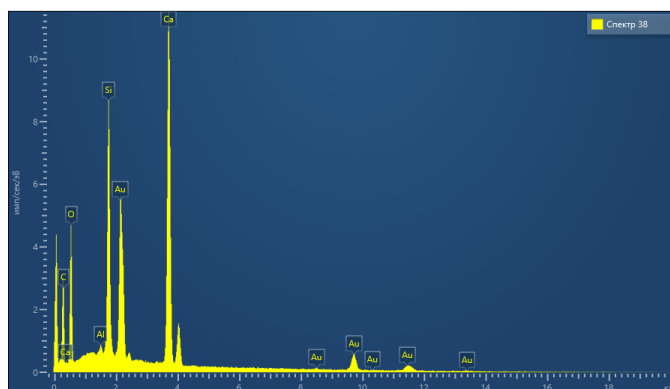


Рис.3.16. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 38.

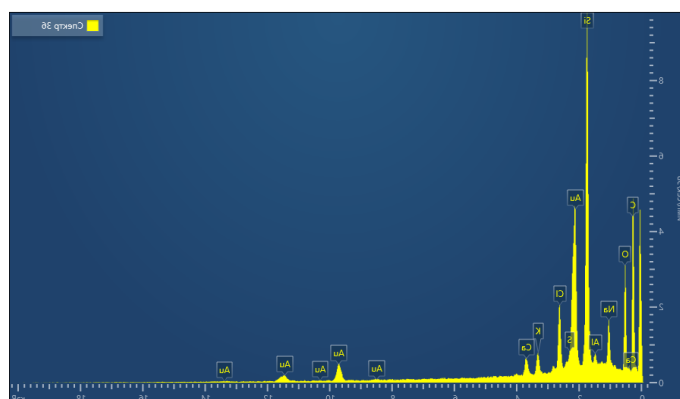


Рис.3.17. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 36.

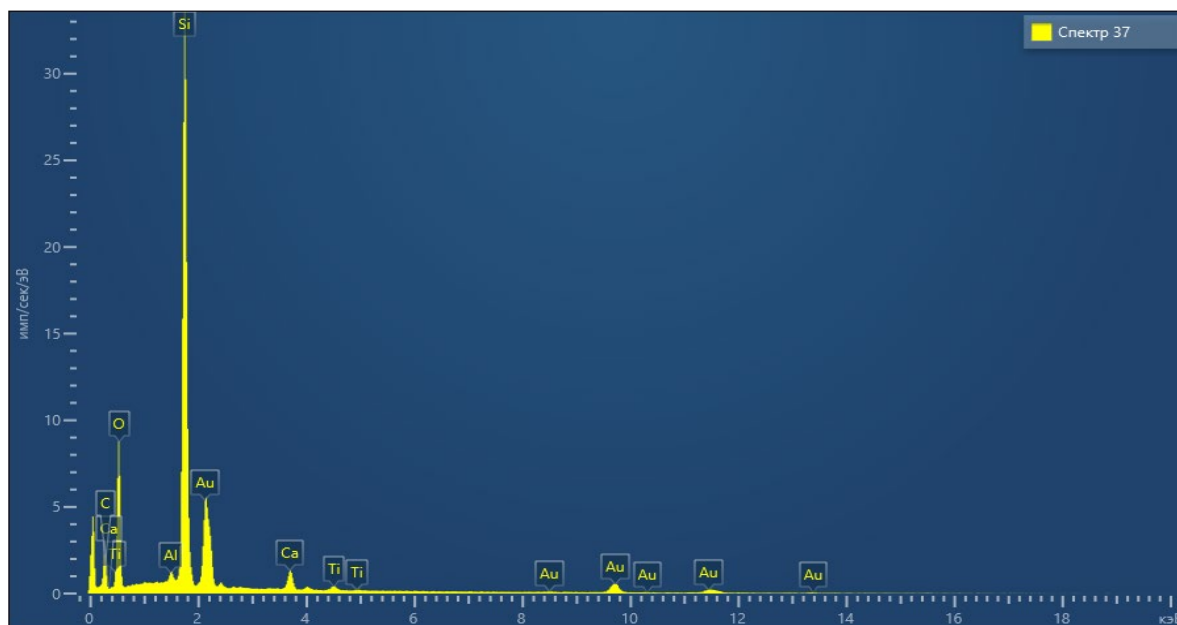


Рис.3.18. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру, які показують наявність елементів в області 37.

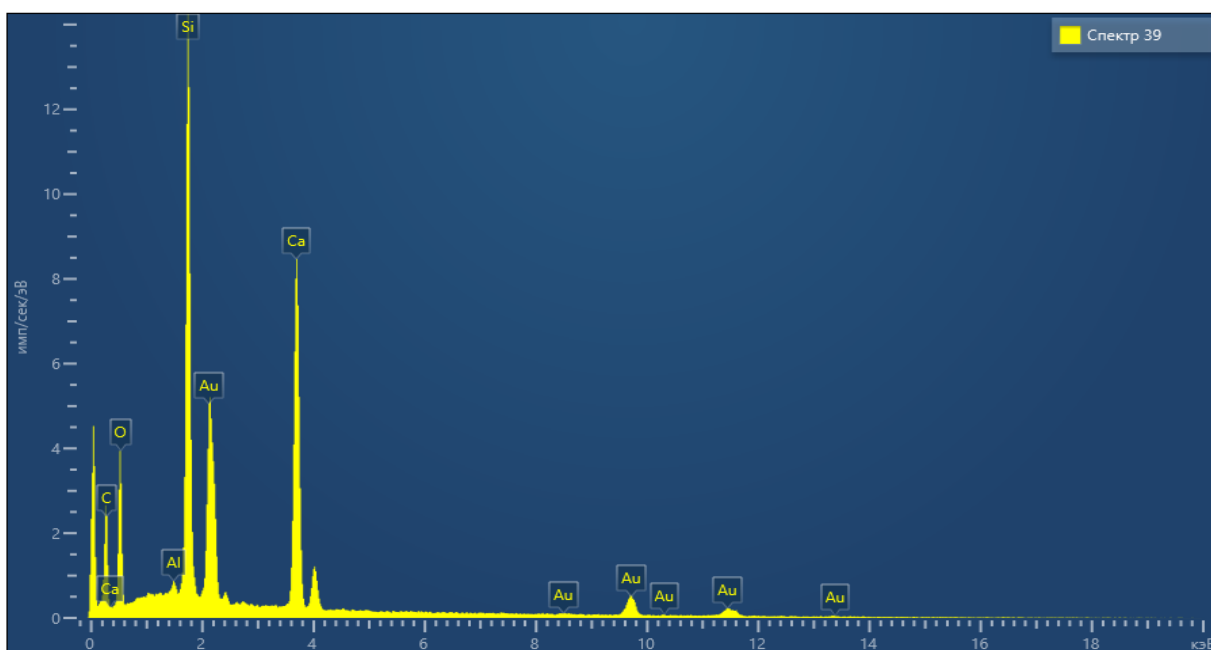


Рис.3.19 Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 39.

Тип результату	Атом. %
-------------------	---------

Резина графіт

Мітка спектра	Спектр 35	Спектр 36	Спектр 37	Спектр 38	Спектр 39
C	53.00	64.39	36.40	35.90	41.71
O	21.12	24.50	42.37	45.16	38.01
Na		1.59			
Al	0.19	0.23	0.38	0.25	0.27
Si	25.69	6.55	19.62	6.50	10.81
S		0.27			
Cl		1.45			
K		0.53			
Ca		0.49	0.99	12.19	9.20
Ti			0.24		
Всього	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Таблиця 3.3. Відсотковий перерахунок на атоми Резина+Графіт

Статистика	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti
Макс	64.39	45.16	1.59	0.38	25.69	0.27	1.45	0.53	12.19	0.24
Мін	35.90	21.12	1.59	0.19	6.50	0.27	1.45	0.53	0.49	0.24
Середній	46.28	34.23		0.26	13.84					
Стандартне відхилення	12.24	10.80		0.07	8.51					

Після цього на кожному з зразків використовуючи енергодисперсійний спектрометр на зразку композиту резина чиста ,будемо досліджувати наявність елементів в обраних областях.

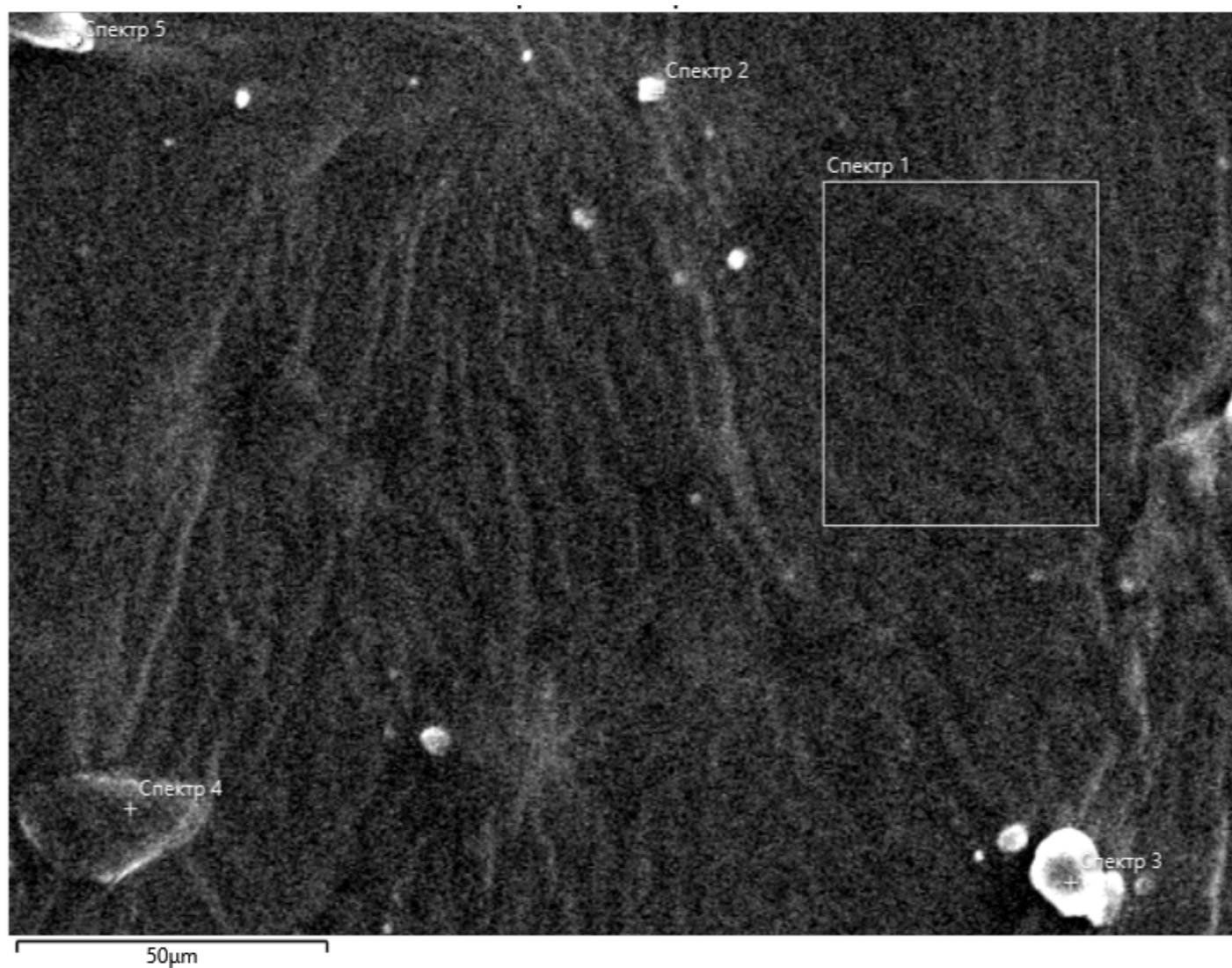


Рисунок 3.20.. Структура чистої резини

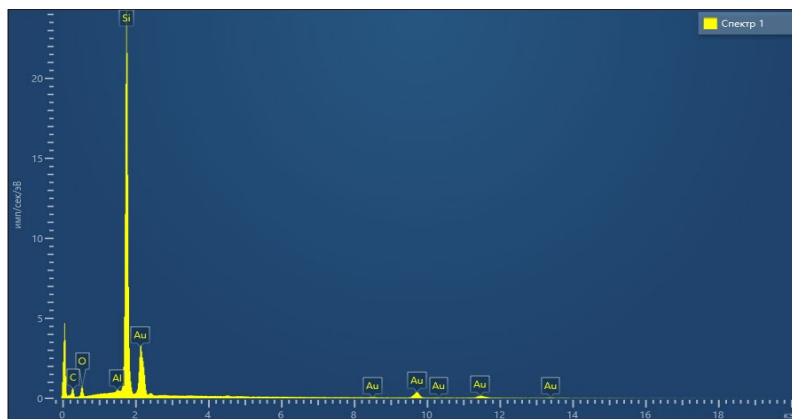


Рис.3.21. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 1.

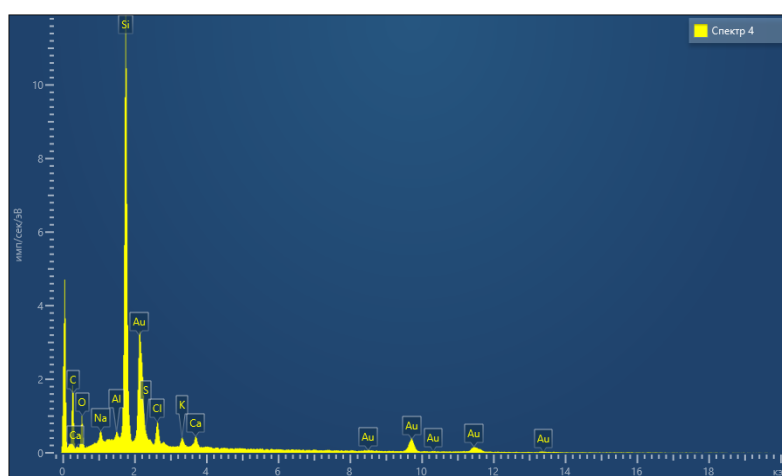


Рис.3.22. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 4.

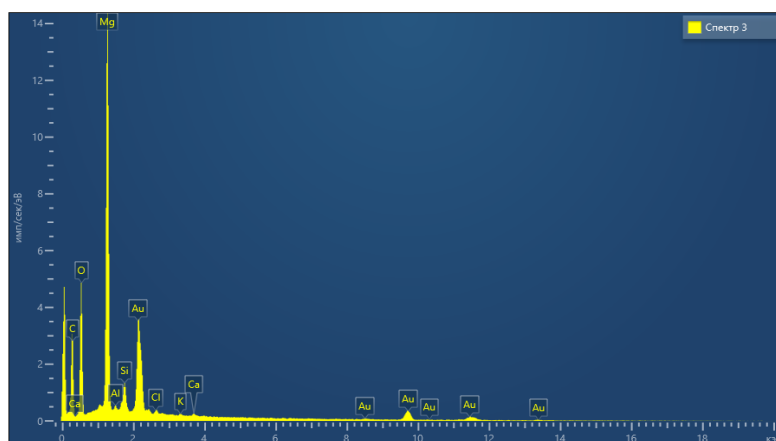


Рис.3.23. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 3.

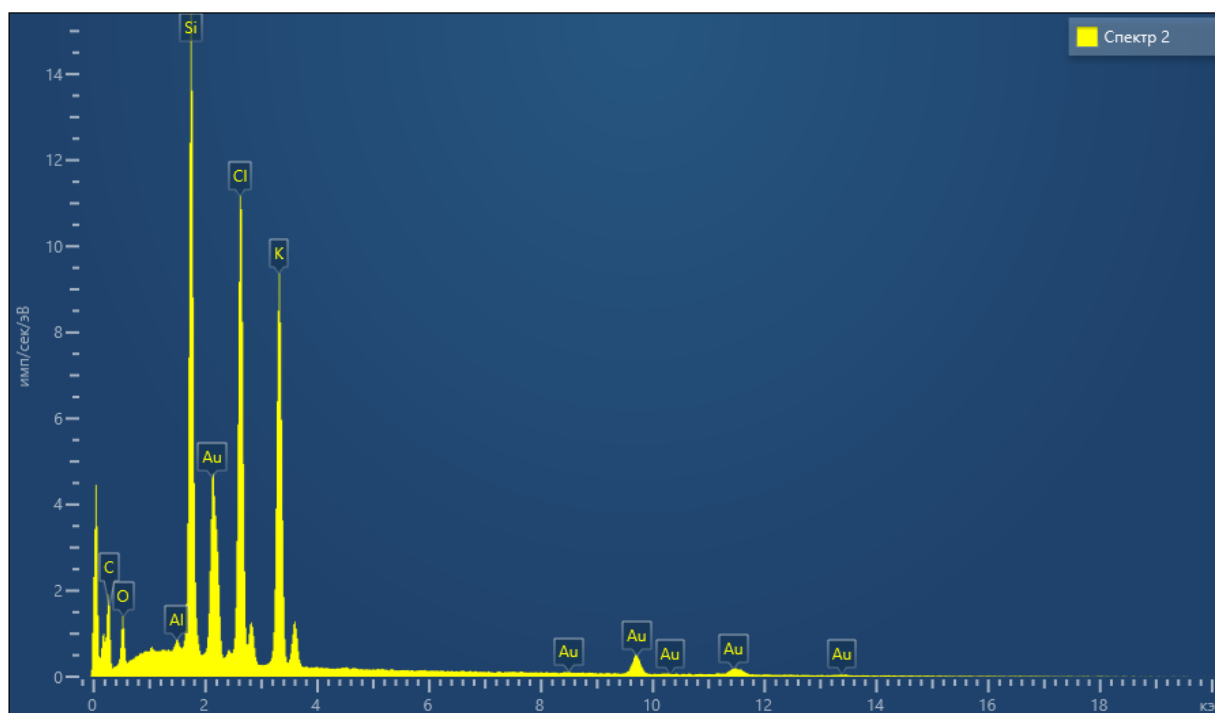


Рис.3.24. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 2.

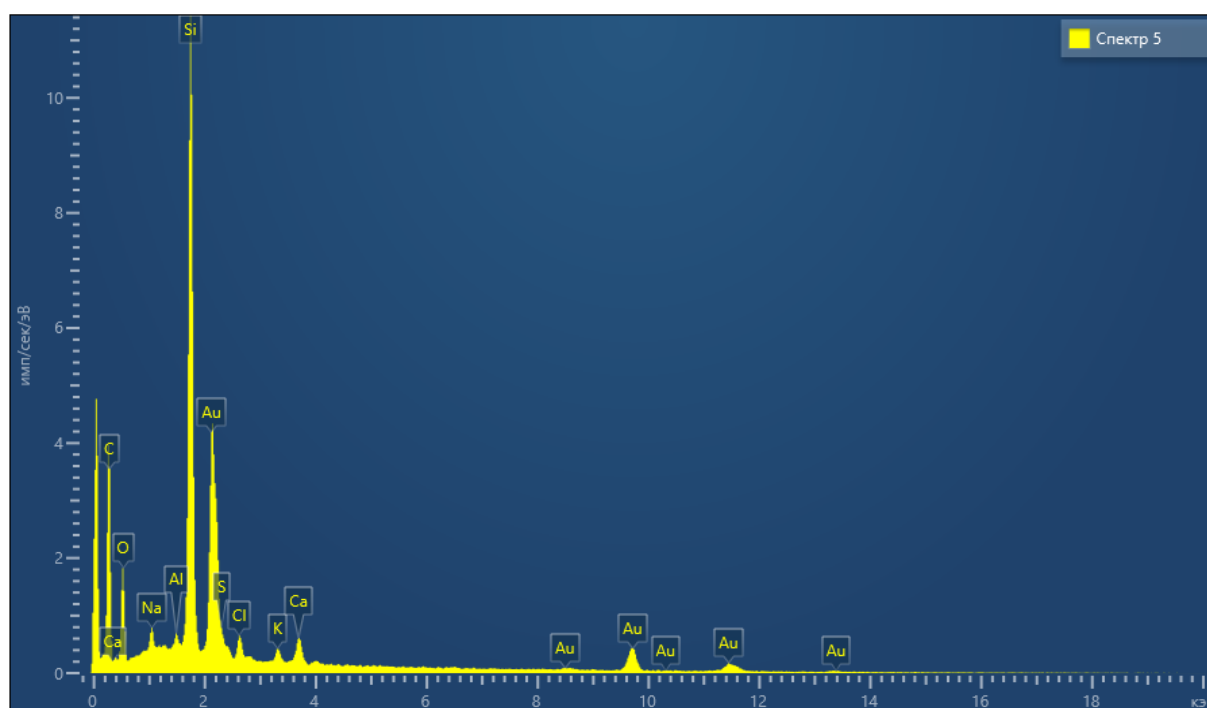


Рис.3.25. Загальний вигляд ліній рентгенівського спектру , які показують наявність елементів в області 5.

Тип результата	А том. %
-------------------	-------------

Резина чиста

Метка спектра	Спек тр 1	Спек тр 2	Спек тр 3	Спек тр 4	Спек тр 5
C	50.36	49.38	49.64	65.65	69.09
O	13.51	15.78	32.93	15.81	18.96
Na				0.70	0.61
Mg			15.86		
ОбравAl	0.24	0.25	0.25	0.31	0.22
Si	35.89	12.27	0.99	14.97	9.44
S				0.43	0.39
Cl		10.90	0.16	1.11	0.45
K		11.42	0.07	0.45	0.27
Ca			0.09	0.58	0.57
Всього	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Таблиця 3.4 Відсотковий перерахунок на атоми Резина чиста

Статистика	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca
Макс	69.09	32.93	0.70	15.86	0.31	35.89	0.43	10.90	11.42	0.58
Мін	49.38	13.51	0.61	15.86	0.22	0.99	0.39	0.16	0.07	0.09
Середній	56.82	19.40			0.25	14.71				
Стандартне Відхилення	9.71	7.81			0.03	12.95				

Обравши з кожного зразка певні спектри ми можемо їх порівняти. З зразка чистої резини було обрано спектри №1 і №3, зі зразка резина+ Ni спектри №12 і №9, зі зразка резина+graphit спектри №35 і №38.

Зразок	Резина+Ni	Резина+graphit	Резина чиста
Мітка спектру	№9	№35	№1
C	55.13	53.0	50.36
O	18.,48	21.12	13.51
Si	25.45	25.69	35.89
Всього	100	100	100

Таблиця 3.5. Порівняльна характеристики спектрів №9,35,38

Зразок	Резина+Ni	Резина+graphit	Резина чиста
Мітка спектру	№12	№38	№2
C	61.61	35.9	49.38
O	27.63	45.16	15.78
Si	5.37	6.5	12.22
Ca		12.19	
Cl			10.9
K			11.42
F	2.12		
Всього	100	100	100

Таблиця 3.6. Порівняльна характеристики спектрів №12,38,2.

Досліджуючи дані спектри ми побачили,що зразки мають різний атомарний склад.Завдяки цьому ми можемо побачити ,що змінюючи склад певної речовини ми можемо змінювати властивості композиту.

РОЗДІЛ 4: РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Дослідження поглинальних покриттів на основі метало-діелектричних композитів	2. В промисловості для створення поверхонь електроприладів, літаків, ракет і кораблів.	Радіолокаційне маскування об'єктів, захисту робочого персоналу від впливу НВЧ випромінювання.
	3. В пристроях широкого застосування, таких як: мобільні телефони, комп'ютери, фото-і відеокамери.	Мініатюрність, мала вага і велика швидкодія сучасних апаратних засобів.
		сумісності вузлів і блоків
		високочастотних пристроїв.
		Радіолокаційне маскування об'єктів, захист робочого персоналу від впливу НВЧ випромінювання.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	ВРМ-2	ВРМ-18	ВРМ-6			
1.	Діапазон робочих частот, ГГц	7 до 13	8 до 13	8 до 12	7,5 12,5			+
2.	Робоча температура, °C	$\begin{matrix} -40 \\ +12 \\ 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -1 \\ 5 \\ +6 \\ 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -4 \\ 0 \\ +1 \\ 2 \\ 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -6 \\ 0 \\ +1 \\ 80 \end{matrix}$			+
3.	Розмір, мм	$2,5 \pm 0,1$	$3,8 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,1$		+	
4.	Коефіцієнт поглинання по потужності на частоті 8 ГГц, дБ	9	9,5	10	10,5	+		

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Виготовлення поглинальних покриттів на основі полімерного композита	Введення різної об'ємної частки нанодисперсного частинок в матеріал матриці	Наявна	Доступна
		Панорамний вимірювач P2-61	Наявна	Доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Всі компоненти наявні в широкому доступі і лише використання панорамного вимірювача P2-61

Доступне лише в лабораторії

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, <i>од</i>	7
2.	Загальний обсяг продаж, <i>грн/ум.од</i>	~ 90000 \$
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15 %

Оскільки середня рентабельність становить близько 15 %, ринок можна вважати прибутковим.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Безпека, Необхідність визначення складу якісного/кількісного середовища	Дослідницькі лабораторії, військова, автомобільна промисловість	Поведінку клієнта формують надійність, висока продуктивність	Достовірність всіх даних про властивості матеріалу, чіткий бізнес-план.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємним тому потрібні кваліфіковані фахівці	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах
2.	Глобальна економічна криза	Проблеми з капіталізацією, зниження продажів	Підвищення цін. Розробка вдосконаленого і більш дешевого методу. Пошук нових ринків.
3.	Проблеми постачання	Проблеми зі збіркою нових пристроїв	Пошук нових постачальників

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Потрібно розробляти і виробляти нові продукти, знижувати витрати їх виробництво і вартість	Ускладнення структури та функціональної наповненості товару
2	Попит	Зацікавленість військової сфери	Налагодження мостів із різними державами.
3	Зростання ринку композиційних матеріалів	Зростання об'ємів продажу	Накопичення капіталу для подальшого вдосконалення компанії

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: - олігополія	На ринку невелика кількість фірм, які займаються поглинальними композитними матеріалами	Підвищувати якість товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованих кадрів

2. За рівнем конкурентної боротьби: - національний	В Україні дуже мала кількість компаній, загалом всі фірми знаходять за кордоном	Створювати локалізований веб-сайт компанії і налагоджувати експорт продукції
---	---	--

3. За галузевою ознакою: - внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	Відслідковувати продукти конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати якість товару
5. За характером конкурентних переваг: - не цінова	Ціна продукції досить висока, тому головне досягти хорошої якості	Продавати товар за конкретною ціною.
6. За інтенсивністю: - не марочна	Боротьба носить явно не марочний характер	Відсутність у галузі такого поняття, як «Бренд».

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	постачальники	Клієнти	Товари і заміники
	Компанія НТЦ «Фарадей»	-	Кількість постачальників	Вимоги до якості (відтворюваність заявлених властивостей)	Замінники існують, але технологічно не вигідні
Висновки:	Інтенсивність висока, продукт є наукоємним. Не кожна фірма здатна розробити такий продукт	-	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Товар має бути якісним та мати сталі властивості	Без обмежень

Незважаючи на високу конкуренцію в даній галузі, входження можливе завдяки низькій вартості і новим можливостям прототипу.

№	Фактор конкурентно спроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів конкурентів у порівнянні з нашим проектом						
			-3	-2	-1		1	2	3
1	Ціна	12			+				
3	Терміни та масовість виробництва	14					+		
3	Хороші робочі характеристик	19							+
	Метод детектування	19				+			

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціна	Оскільки ціна нижча ніж у конкурентів
2	Терміни та масовість виробництва	Необхідно вчасно постачати продукт і знижувати ціну виробництва.
3	Гарні робочі характеристики	Сенсорні можливості пристрою знаходяться на рівні з конкурентами.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: гарні робочі характеристики, надійність	Слабкі сторони: ціна.
Можливість знизити витрати на виробництво продукції, покращувати електродинамічні властивості.	Загрози: відсутність кваліфікованих кадрів на ринку праці; зниження попиту; поява нових конкурентів.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Розробка більш дешевого композита з такими ж властивостями.	50 %	3 роки
2.	Розробка більш дешевого композита з гіршими властивостями.	75 %	1.5 роки

Обрано альтернативу № 2.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Дослідницькі лабораторії	Готові	Високий	Низька	Низька
2.	Військові структури	Готові	Високий	Висока	Висока
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1 та №2.					

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
---	--------------------------------------	---------------------------	--	----------------------------

1.	Розробка більш дешевого композита з такими ж властивостями	За рахунок пріоритету вибору більш дешевого аналога з подібними характеристиками	Можливість досягнення тих же результатів з використанням більш дешевих підходів	Стратегія лідерства на витратах
----	--	--	---	---------------------------------

2.	Розробка більш дешевого композита з дещо гіршими властивостями	За рахунок пріоритету вибору більш дешевого аналога	Дещо понизити рівень пропонованих властивостей продукту, щоб знизити ціну	Стратегія диференціації
----	--	---	---	-------------------------

Обрано стратегію диференціації.

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Обидва варіанти	Ні	Заняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто спроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Якість	Лідерства на витратах	Висока якість	Оптимальне співвідношення ціна/якість, покращення існуючих характеристик.
2	Точність	Лідерства на витратах	Висока точність	
3	Ціна	Лідерства на витратах	Низька ціна	

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Низька ціна	Найнижча ціна на ринку	Найнижча ціна на ринку
2	Висока якість	Висока якість	Висока якість
3	Високі електродинамічні властивості	Одні із найкращих властивості	Хороший коефіцієнт поглинання

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Поглинальне покриття на основі метало-діелектричних композитів		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	M/ H M	Bp/Tx /Tл/E/Op
	1. Діапазон робочих частот	M	Bp
	2. Коефіцієнт поглинання	M	Tx
	3. Робоча температура	M	Tл
	Якість: відповідає вимогам стандартів		
	Пакування: пристрій, гарантійний талон		
III. Товар із підкріпленням	Марка: «POLYMER»		
	До продажу: договір, гарантія.		
	Після продажу: доставка, обслуговування.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентні права.			

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	-	300 – 800\$	більше 8000\$	200 – 600\$

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Найкращі характеристики за найнижчу ціну	Встановлення контакту з клієнтами, інформування про характеристики сенсора, зберігання.	Канал першого рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, які використовують цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Вибір найбільш привабливого і надійного продукту	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Якість, високі властивості	Показати всі переваги вдосконаленого продукту.	Хороші характеристик и та висока якість

Висновки до розділу

Після проведення аналізу, виведення продукту на ринок є конкурентоспроможним та рентабельним. Рентабельність виражається у низькому рівні конкуренції, зростанні попиту на продукцію та динаміці ринку, де все більше та більше з'являється пропозицій на вдосконалення методів вимірювання параметрів композиційних матеріалів .

Основними клієнтами, зацікавленими у використанні даних пристроїв є лабораторії, в промисловості для створення металевих поверхонь літаків, ракет і кораблів. Проблем входження у ринок не передбачено.

Головними показниками конкурентоспроможності проекту є його малогабаритність порівняно з аналогами, якість електродинамічних властивостей, великий діапазон робочих частот.

ВИСНОВКИ

1. Теоретично досліджено властивості метало-діелектричних композиційних матеріалів у НВЧ діапазоні частот.

2. Дослідження композитних матеріалів проводилися раніше на кафедрі мікроелектроніки. Повноти даних не вистачало для дослідження мікроструктури і хімічного аналізу експериментальних матеріалів для підтвердження складу та структури, що впливає на електричні властивості. Дослідження проводили в лабораторії ІНМ ім. В. М. Бакуля Національної Академії Наук України на РЕМ ZEISS EVO 50XVP виробництва фірми ZEISS. Результати підтвердили припущення про структуру і хімічний склад зразків. Досліджуючи дані спектри ми побачили, що зразки мають різний атомарний склад. Завдяки цьому ми можемо побачити, що змінюючи склад певної речовини ми можемо змінювати властивості композиту. Досліджуючи дані спектри ми побачили, що зразки мають різний атомарний склад. Завдяки цьому ми можемо побачити, що змінюючи склад певної речовини ми можемо змінювати властивості композиту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гоулдстейн, Дж. Растрова електронна мікроскопія і рентгенівський мікроаналіз: в 2 т. / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбері, П. Ечлін і ін. - М.: Мир, 1984.
2. Weilie Zhou. Scanning Microscopy for Nanotechnology (Techniques and Applications). / Weilie Zhou (Ed.) Zhong Lin Wang (Ed.) Springer. 2006. 522 p.
3. Брандон, Д. Мікроструктура матеріалів. Методи дослідження і контролю / Д. Брандон, У. Каплан. - М.: Техносфера, 2004. - 384 с.
4. Криштал, М.М. Скануюча електронна мікроскопія і рентгеноспектральний мікроаналіз в прикладах практичного застосування / М.М. Криштал, І.С. Ясніков, В.І. Полунін і ін. - М.: Техносфера, 2009. - 208 с.
5. Биков, Ю. А. Растрова електронна мікроскопія і рентгеноспектральний аналіз. Апаратура, принцип роботи, застосування / Ю. А. Биков, С. Д. Карпукін, М. К. Бойченко та ін. Електр. дан. М.: МГТУ ім. Н. Е. Баумана, 2003. Режим доступу: <http://lab.bmstu.ru/rem/index/htm>
6. Банний ВА, Євтухова ЛА, Ігнатенко ВА. Полімерні композитні матеріали для захисту біологічних об'єктів від електромагнітних полів та випромінювань на основі термопластів та біополімерів. Известия Гомельського державного університету імені Ф. Скорини. 2012; 5 (74): 87-91.
7. Банний ВА, Ігнатенко ВА, Євтухова ЛА. Радіопоглощающую водосодержащие материалы для обеспечения электромагнитной экологии. В: Актуальные проблемы медицины: материалы Республиканской научно-практической конференции; 2013: Гомель: ГГМУ; 2013.

8. Банний ВА, Ігнатенко ВА. Неткані і комбінірованні радіопоглинаючі матеріали на основі полімерних композитів. Фундаментальні проблеми радіоелектронного приладобудування. 2014; 14 (3): 83-86.
9. Цянь Сонгсонг, Банний ВА, Самофалов АЛ, Семченко ІВ, Хахомов СА. Поглиначі електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону на основі полімерних композитів і кіральних структур. Проблеми фізики, математики та техніки. 2014; 4 (21): 1-6.
10. Банний ВА, Азаренка АС, Ігнатенко ВА. Композиционные радиопоглощающие материалы на основе энантиоморфных структур. Филиппов П.Г., Шевченко В.Г., Пономаренко А.Т. и др. Электрические свойства полимерных композитов с электропроводящими дисперсными и волокнистыми наполнителями. Сер. Общеотраслевые вопросы. № 11. М.: Обзорная информация, 1984. 55 с.
12. Je_erson F., Lindsey I. // Intern. Symp. Digest Antennas and Propagation. Philadelphia, 1986. Vol. 1. P. 113.120.
13. Myazakiy, Tominaga S. // IEEE Intern. Symp. Electromagn. Compat. Arlington, 1983. P. 101.116.
14. Машкович М.Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. М.: Сов. радио, 1969. 240 с.
15. Гарин Б.М., Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. Физические свойства резистивных нитей и структур на их основе в СВЧ диапазоне// ЖТФ.– 1999.– т.69.–№1.– с. 104–108.
16. Электрофизические свойства перколяционных систем /Под ред. А.Н. Лагарькова. М.: ИВТАН, 1990. 120 с. Филиппов П.Г., Шевченко В.Г., Пономаренко А.Т. и др. Электрические свойства полимерных композитов с электропроводящими дисперсными и волокнистыми наполнителями. Сер. Общеотраслевые вопросы.
17. Je_erson F., Lindsey I. // Intern. Symp. Digest Antennas and Propagation.

- Philadelphia, 1986. Vol. 1. P. 113.120.
18. Myazakiy, Tominaga S. // IEEE Intern. Symp. Electromagn. Compat. Arlington, 1983. P. 101.116.
 19. Машкович М.Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. М.: Сов. радио, 1969. 240 с.
 20. Гарин Б.М., Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. Физические свойства резистивных нитей и структур на их основе в СВЧ диапазоне// ЖТФ.– 1999.– т.69.–№1.– с. 104–108.
 21. Электрофизические свойства перколяционных систем /Под ред. А.Н. Лагарькова. М.: ИВТАН, 1990. 120 с. Compat. Arlington, 1983. P. 101.116.
 22. Машкович М.Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. М.: Сов. радио, 1969. 240 с.
 23. Гарин Б.М., Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. Физические свойства резистивных нитей и структур на их основе в СВЧ диапазоне// ЖТФ.– 1999.– т.69.–№1.– с. 104–108.
 24. Электрофизические свойства перколяционных систем /Под ред. А.Н. Лагарькова. М.: ИВТАН, 1990. 120 с.
 25. Композиты на основе диэлектриков в технике СВЧ ДД Татарчук, ЮМ Поплавко, ВА Казмиренко, АВ Борисов, ЮВ Диденко Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника 59 (2), 33-43
 26. Composites based on dielectric materials for microwave engineering DD Tatarchuk, YM Poplavko, V Kazmirenko, OV Borisov, YV Didenko Radioelectronics and Communications Systems 59 (2), 74-82
 27. Многослойные покрытия на основе композитных материалов для защиты от электромагнитного излучения ЮВ Диденко, ИВ Пацёра, ДД Татарчук Прикладная радиоэлектроника, 519-521
 28. Экранирующие свойства композитных структур

металлдиэлектрик в СВЧ диапазоне ЮВ Диденко, ВИ Молчанов, АО Олексенко, ИВ Пацёра, ДД Татарчук, ...Прикладная радиоэлектроника, 104-107

29. Анализ СВЧ-свойств нанодисперсных композитных систем АВ Мачулянский, ДД Татарчук, ВА Мачулянский Технічна електродинаміка